

# **Anwendung von direkten Kraftanzeigern in vorgespannten Verbindungen**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,  
Abteilung Bauwissenschaften,  
der Universität Duisburg-Essen  
zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation

von

**Dipl.-Ing. Markus Schiborr**

aus Essen

Referentin: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner  
Korreferenten: em. Prof.ir. Frans S.K. Bijlaard  
Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Herbert Schmidt

Eingereicht: 14. Dezember 2015

Mündliche Prüfung: 21. April 2016

Essen, 2017





In Gedenken an meine Mutter



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen in Essen.

Die Anregung zum Thema der Arbeit erhielt ich von meiner geschätzten Doktormutter Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. NATALIE STRANGHÖNER. Für ihr Vertrauen, ihre vielfältige und persönliche Unterstützung, die mir gewährten Freiräume und die schlussendliche Übernahme des Referats danke ich ihr herzlich.

Die bereitwillige Übernahme der Korreferate durch Herrn em. Prof.ir. FRANS S.K. BIJLAARD und Herrn Prof. em. Dr.-Ing. HERBERT SCHMIDT empfinde ich aufgrund ihres praktizierten „Altersunruhestandes“ als große Ehre. Für ihre kritische Betrachtung dieser Arbeit und die hilfreichen Anmerkungen danke ich ihnen vielmals.

Für die bereitwillige Begleitung des Promotionsverfahrens als Vorsitzender der Prüfungskommission danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. RENATUS WIDMANN sehr.

Allen aktiven und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen sowie studentischen Hilfskräften des Instituts für Metall- und Leichtbau gilt mein Dank für den freundschaftlichen Umgang und die kollegiale Zusammenarbeit.

Mit ihrem großen Interesse und Engagement – insbesondere bei der Durchführung unzähliger experimenteller Untersuchungen mit ungewissem Verlauf – haben YARA MOOSMANN, M.Sc., CHRISTIAN BÜCKER, M.Sc. und CHRISTIAN HANSEN, M.Sc. durch die Anfertigung ihrer Abschlussarbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Der Beitrag von Herrn CHRISTIAN SCHOEDEN bei der versuchstechnischen Umsetzung und bei zahlreichen kurzfristigen Problemlösungen war von unschätzbarem Wert. Ihm gilt mein besonderer Dank.

Herrn Hon.-Prof. Dr.-Ing. CONSTANTIN VERWIEBE danke ich für die Einblicke in die Ausführungspraxis vorgespannter Schraubenverbindungen – in dieser Arbeit durch Fotos von Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten am Tetraeder in Bottrop dokumentiert – sowie seine baupraktische Sichtweise in tiefgründigen und kritischen Diskussionen.

Weiterer Dank gebührt den Firmen AUGUST FRIEDBERG GMBH, Gelsenkirchen, vertreten durch Herrn Dr.-Ing. SELÇUK GÜREŞ und Herrn Dipl.-Ing. CARSTEN STOLLE, FUCHS SCHRAUBENWERK GMBH, Siegen, vertreten durch Herrn Dr.-Ing. VOLKER DÜNKEL sowie PEINER UMFORMTECHNIK GMBH, Peine für die Bereitstellung von Schraubengarnituren sowie den genannten Herren für den hochgeschätzten Erfahrungsaustausch. Der Firma FATOR TORNILLERÍA INDUSTRIAL SA aus Spanien sei für die Bereitstellung von direkten Kraftanzeigern gedankt.

Für ihre endlose Geduld, vielfältige Unterstützung und steten Impulse auf dem Weg zum erfolgreichen Abschluss meiner Promotion danke ich meiner Familie von Herzen.

Bottrop, im April 2016

Markus Schiborr

## Kurzfassung

Das Verfahren mit direkten Kraftanzeigern (engl. Direct Tension Indicator, DTI) ist eines von mehreren nach EN 1090-2 angebotenen und geregelten Anziehverfahren zum Vorspannen von hochfesten Schraubengarnituren. Der Einsatz von direkten Kraftanzeigern ist in Deutschland weitestgehend unbekannt. Aufgrund von mangelnder Anwendungserfahrung wurde das Verfahren über den Nationalen Anhang DIN EN 1993-1-8/NA ausgeschlossen.

Für dieses Anziehverfahren wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein allgemeines Verständnis über das Last-Verformung-Verhalten des DTI sowie über das Tragverhalten der vorgespannten Verbindung mit DTI gewonnen. Darüber hinaus wird überprüft, ob in einer mittels DTI vorgespannten Verbindung der Erhalt der Vorspannkraft auch bei axialer zentrischer Zugbeanspruchung gewährleistet ist. Eine solche Beanspruchung ist nach EN 1993-1-8 ohne besondere Einschränkungen zugelassen.

Die experimentellen Untersuchungen bestehen aus Drucklastversuchen an einzelnen DTI sowie Anziehversuchen an Garnituren mit DTI, um das Erreichen der Mindestvorspannkraft unter Anwendung der Fühllehre zu überprüfen. Vorspannte Bauteile, für die die Vorspannkraft mit Hilfe der Fühllehre eingebracht wurde, ermöglichen unter Zugbeanspruchung die Beobachtung der vorhandenen Schraubenkraft und von Vorspannkraftverlusten.

Mit den verfügbaren Last-Verformung-Kurven aus den Drucklastversuchen wird das Verspannungsschaubild für die vorgespannte Schraubenverbindung um die elastischen und plastischen Eigenschaften der vorliegenden DTI erweitert. Damit werden zum einen die durchgeführten Zugversuche auf Grundlage von VDI 2230-1 hinsichtlich der Schraubenzusatzkräfte und Vorspannkraftverluste nachgerechnet, zum anderen die geometrischen Grenzen der vorliegenden Versuche um weitere Varianten mit unterschiedlichen Schrauben und Klemmlängen erweitert.

Das mechanische Modell auf Grundlage des Verspannungsschaubildes hat für die Zugversuche in der Montagekonfiguration mit DTI unter dem Schraubenkopf und gedrehter Mutter eine gute Übereinstimmung zu den Versuchen hinsichtlich der Vorspannkraftverluste aus dem Verhalten des DTI bei Laststeigerung gezeigt. Die Untersuchung von Fallbeispielen anhand von unterschiedlich großen Montagevorspannkräften, Beanspruchungsniveaus und Klemmlängen hat ergeben, dass

eine Begrenzung der einwirkenden Zugkraft auf die etwa 0,6- bis 0,7-fache Mindestvorspannkraft die aus dem Verformungsverhalten der untersuchten DTI resultierenden Vorspannkraftverluste auf weniger als 5 % der Mindestvorspannkraft begrenzen kann. Bei einer vorausgesetzten Montagevorspannkraft der 1,1-fachen Mindestvorspannkraft wäre dadurch der Erhalt der Mindestvorspannkraft gegeben.

Anhand der experimentellen Untersuchungen und der Modellberechnungen ist ersichtlich, dass der Erhalt der Vorspannkraft unter Zugbeanspruchung stark vom Niveau der Montagevorspannkraft abhängig ist. Da die derzeitigen Gebrauchseignungsprüfungen im Rahmen der normativen Anforderungen nur die Einbringung der einfachen Mindestvorspannkraft gewährleisten, sind die zulässigen Zugbeanspruchungen für vorgespannte Verbindungen mit DTI im Rahmen der Bemessung nach EN 1993-1-8 zu reduzieren. Anderenfalls kann nur generell vom Einsatz des Verfahrens mit DTI in zugbeanspruchten Verbindungen abgeraten werden.

## Abstract

The direct tension indicator (DTI) method is one of several tightening methods specified in EN 1090-2 for tightening high-strength structural bolting assemblies to the minimum required preloading force. As the application of direct tension indicators in preloaded bolted connections is largely unknown in Germany and so there is no experience of this method, the use of the DTI method has so far been excluded in Germany by the national annex DIN EN 1993-1-8/NA.

Within the scope of the present study for this tightening method a general understanding of the load-deformation behaviour of the DTI as well as the bearing behaviour of the prestressed connection with DTI is obtained. In addition, it is examined whether the preservation of the preloading force as a result of the DTI method is ensured under external tensile loading. Such a type of loading is permitted according to EN 1993-1-8 without any restrictions.

The experimental investigations consist of compression tests and tightening tests to check the application of a feeler gauge with regard to the achievement of the minimum required preloading force. Tensile tests on preloaded bolted connections give information about the actual bolt force and loss of preload.

The joint diagram according to VDI 2230-1 was extended by the elastic and plastic resilientcies of the different DTIs investigated in the compression tests. Herewith on the one hand the experimental tensile tests are simulated. On the other hand the geometrical limitations of the tests are expanded by further variety of the type of bolt and the clamping length.

The mechanical model based on the joint diagram showed a good correlation for the assembly configuration with DTI under the bolt head and rotated nut regarding the loss of preload. The case study on different levels of preload, levels of tensile loading and clamping lengths showed, that a limitation of the external tensile load to 0.6 to 0.7 times the minimum preloading force may limit the loss of preload induced by the deformation behaviour of the DTI to a maximum of 5 % of the minimum required preloading force. Considering an assembly preload 1.1 times the minimum required preloading force the preservation of the minimum preloading force is ensured.

On the basis of the experimental investigations and the model calculations it can be seen, that under an external tensile loading the preservation of the preloading force mainly depends on the initial level of preloading force. Since the

“suitability test for preloading” only ensures the required minimum preloading force the maximum permissible external tensile loading specified in EN 1993-1-8 should be decreased for the application of the DTI method. Otherwise the DTI method should not be used for preloading structural bolting assemblies which are loaded in tension.



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung .....	1
1.2	Zielsetzung .....	4
1.3	Vorgehensweise .....	4
<b>2</b>	<b>Vorspannen von geschraubten Verbindungen .....</b>	<b>7</b>
2.1	Allgemeines .....	7
2.2	Wirkungsweise der Vorspannung .....	7
2.3	Größe und Anwendungszweck der Vorspannung .....	13
2.4	Verbindungselemente – Garnituren.....	16
2.5	Methoden zum Vorspannen .....	17
2.5.1	Allgemeines.....	17
2.5.2	Reibungsverhältnisse, k-Faktor und k-Klassen .....	18
2.5.3	Gebrauchseignung der Verbindungselemente .....	21
2.5.4	Anziehverfahren nach EN 1090-2 .....	25
<b>3</b>	<b>Direkte Kraftanzeiger – Stand der Technik.....</b>	<b>47</b>
3.1	Entwicklung, Verbreitung und Anwendung .....	47
3.1.1	Großbritannien .....	47
3.1.2	Nordamerika .....	51
3.1.3	Asien.....	53
3.1.4	Deutschland .....	53
3.2	Besondere kritische Anmerkungen.....	55
3.3	Bestehende Untersuchungen – Literaturschau .....	62
3.3.1	Allgemeines.....	62
3.3.2	Unabhängige Untersuchungen .....	63
3.3.3	Untersuchungen und Publikationen der Hersteller – Hintergrund.....	83
3.3.4	Zusammenfassung .....	85
3.4	Weiterentwicklung des direkten Kraftanzeigers .....	86
3.5	Normative Regelungen .....	89
3.5.1	Allgemeines.....	89
3.5.2	Berechnung und Bemessung .....	91
3.5.3	Prüfung und Anwendung .....	104

---

3.6	Ausblick auf Veränderungen .....	123
3.7	Zusammenfassung .....	124
3.8	Offene Fragen .....	127
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen zum Vorspannen mit direkten Kraftanzeigern .....</b>	<b>129</b>
4.1	Versuchsprogramm .....	129
4.2	Prüfteile und Verbindungselemente .....	132
4.2.1	Prüfteile – Direkte Kraftanzeiger .....	132
4.2.2	Weitere Verbindungselemente .....	137
4.3	Drucklastversuche an direkten Kraftanzeigern .....	139
4.3.1	Allgemeines .....	139
4.3.2	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	139
4.3.3	V Versuchsergebnisse und Bewertung .....	146
4.4	Anziehversuche an Garnituren mit direkten Kraftanzeigern .....	153
4.4.1	Allgemeines .....	153
4.4.2	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	154
4.4.3	V Versuchsergebnisse und Bewertung .....	159
4.5	Zugversuche an vorgespannten Verbindungen mit direkten Kraftanzeigern .....	174
4.5.1	Allgemeines und Fragestellungen .....	174
4.5.2	Messung der Schraubenkraft.....	175
4.5.3	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	181
4.5.4	V Versuchsergebnisse und Bewertung .....	191
4.5.5	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	215
4.6	Vergleichbarkeit der Versuchsarten .....	218
<b>5</b>	<b>Modellbildung mit direkten Kraftanzeigern .....</b>	<b>225</b>
5.1	Allgemeines .....	225
5.2	Nachgiebigkeiten der Komponenten.....	225
5.2.1	Allgemeines .....	225
5.2.2	Sechskantschraube und –mutter .....	227
5.2.3	Bauteile .....	229
5.2.4	Flache Scheiben .....	232
5.2.5	Direkte Kraftanzeiger .....	233
5.3	Krafteinleitungsfaktor .....	244
5.4	Erweiterung des Verspannungsschaubildes .....	246
5.4.1	Nachgiebigkeit des direkten Kraftanzeigers .....	246
5.4.2	Vorspannkraftverluste durch Setzen .....	248

5.4.3	Klaffen der Trennfuge .....	249
5.4.4	Verspannungsschaubild und Kennwerte .....	250
5.5	Anwendung des Modells auf die Bauteil-Zugversuche .....	255
5.6	Beurteilung der Ergebnisse des Berechnungsmodells .....	260
5.7	Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des Modells.....	264
5.8	Fallbeispiele.....	266
5.8.1	Allgemeines.....	266
5.8.2	Einfluss der Nachgiebigkeitsverhältnisse .....	269
5.8.3	Einfluss des Vorspannkraftniveaus.....	270
5.8.4	Einfluss des Beanspruchungsniveaus .....	275
5.8.5	Begrenzung der Axialkraft zur Vermeidung von Vorspannkraftverlusten.....	279
<b>6</b>	<b>Empfehlungen für die Prüfung und Anwendung von direkten Kraftanzeigern.....</b>	<b>281</b>
6.1	Allgemeines .....	281
6.2	Eignungsprüfung nach EN 14399-9 .....	281
6.3	Kalibrierprüfung unter Baustellenbedingungen nach EN 1090-2 .....	284
6.4	Vollständiges Schließen der Spalte beim Anziehen .....	286
6.5	Eignung des DTI für den Einsatz in zugbeanspruchten Verbindungen.....	289
6.6	Allgemeine Weiterentwicklung der Regelwerke.....	290
6.7	Anwendung und Anwendungsbeispiele .....	294
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>303</b>
7.1	Zusammenfassung.....	303
7.2	Ausblick .....	309
<b>8</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>311</b>
<b>9</b>	<b>Normen, Richtlinien und Zulassungen .....</b>	<b>325</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Drucklastversuche .....</b>	<b>A-1</b>
A.1	Laststufen des erweiterten Prüfablaufs.....	A-1
A.2	Ergebnisse der Prüfserien .....	A-2
<b>Anhang B</b>	<b>Anziehversuche .....</b>	<b>B-1</b>
B.1	Einzelergebnisse der Prüfungen.....	B-1

---

<b>Anhang C</b>	<b>Bauteil-Zugversuche .....</b>	<b>C-1</b>
C.1	Kalibrierung der Prüfschrauben.....	C-1
C.2	Prüfvorrichtung für Bauteil-Zugversuche .....	C-2
C.3	Einzelergebnisse der Prüfungen .....	C-4
C.4	Schraubenkräfte zwischen Anziehen und Zugversuch .....	C-128
C.5	Vorspannkraftverluste durch Schraubenzusatzkräfte .....	C-129
C.6	Montagevorspannkkräfte aus Anziehversuchen und Bauteil-Zugversuchen .....	C-136
C.7	Last-Verformung-Verhalten des DTI .....	C-139
<b>Anhang D</b>	<b>Modellbildung mit direkten Kraftanzeigern .....</b>	<b>D-1</b>
D.1	Nachgiebigkeit von Schraubengarnituren und Bauteilen .....	D-1
D.2	Nachgiebigkeiten des DTI .....	D-5
D.3	Krafteinleitungsfaktoren .....	D-7
D.4	Verspannungsschaubilder für Betriebszustände mit DTI ....	D-10
D.5	Grenzen der Fallunterscheidung für Schraubenzusatzkräfte und Verformungen .....	D-14
D.6	Vergleich von Versuch und Modell – individuelle Prüfungen .....	D-15
D.7	Streudiagramme für Versuch und Modell.....	D-46
<b>Anhang E</b>	<b>Sonstiges .....</b>	<b>E-1</b>

## Formelzeichen

$A_{d_3}$	Kernquerschnitt des Gewindes (DIN 13-28) [mm <sup>2</sup> ]
$A_L$	Querschnittsfläche eines Lochs [mm <sup>2</sup> ]
$A_N$	Nennquerschnitt der Schraube (VDI 2230-1) [mm <sup>2</sup> ]
$A_S$	Spannungsquerschnitt des Schraubengewindes (VDI 2230-1) [mm <sup>2</sup> ]
$A_s$	Spannungsquerschnittsfläche einer Schraube (EN 1993-1-8) [mm <sup>2</sup> ]
$A_{Sch}$	Schaftquerschnitt der Schraube [mm <sup>2</sup> ]
$A_{Sch,net}$	Nettoquerschnittsfläche des Schraubenschaftes mit Lochschwächung [mm <sup>2</sup> ]
$A_{Shb}$	Nennquerschnitt der flachen Scheibe [mm <sup>2</sup> ]
$A_t$	Spannungsquerschnitt der Schraube { <i>tensile stress area of a bolt</i> } (BS 5950-1) [mm <sup>2</sup> ]
$a$	Koeffizient $a$ der Regressionsfunktion [mm/kN]
$a_k$	Abstand zwischen dem Rand der Vorspannfläche und dem Krafteinleitungsort am Grundkörper (VDI 2230-1) [mm]
$b$	Koeffizient $b$ der Regressionsfunktion [–]
$C$	Steifigkeit, allgemein [N/mm]
$C_p$	elastische Steifigkeit der Bauteile [N/mm]
$C_s$	elastische Steifigkeit der Schraubengarnitur [N/mm]
$D$	Außendurchmesser (Nenndurchmesser) des Gewindes einer Mutter (ISO 225) [mm]
$D_A$	Ersatzaußendurchmesser des Grundkörpers in der Trennfuge (VDI 2230-1) [mm]
$D'_A$	Ersatzaußendurchmesser des Grundkörpers (VDI 2230-1) [mm]
$D_{A,Gr}$	Grenzaußendurchmesser, maximaler Durchmesser des Verformungskegels (VDI 2230-1) [mm]
$D_{km}$	wirksamer Durchmesser für das Reibungsmoment in der Schraubenkopf- oder Mutterauflage (VDI 2230-1) [mm]
$d$	Schraubendurchmesser (Nenndurchmesser) [mm]
$d_1$	Innendurchmesser der flachen Scheibe (EN 14399-6) [mm]
$d_2$	Außendurchmesser der flachen Scheibe (EN 14399-6) [mm]
$d_2$	Außendurchmesser des direkten Kraftanzeigers (EN 14399-9) [mm]
$d_2$	Flankendurchmesser des Außengewindes (DIN 13-1) [mm]
$d_3$	Kerndurchmesser des Außengewindes (DIN 13-1) [mm]

---

$d_3$	Tangentialdurchmesser des Überstands des direkten Kraftanzeigers (EN 14399-9) [mm]
$d_4$	Innendurchmesser des Überstands des direkten Kraftanzeigers (EN 14399-9) [mm]
$d_h$	Bohrungsdurchmesser der verspannten Teile (DIN EN 20273) [mm]
$d_L$	Lochdurchmesser [mm]
$d_{Sch}$	Schaftdurchmesser [mm]
$d_w$	äußerer Durchmesser der Auflagefläche (ISO 225) [mm]
$E$	Elastizitätsmodul, allgemein [N/mm <sup>2</sup> ]
$E_p$	Elastizitätsmodul der verspannten Teile (VDI 2230-1) [N/mm <sup>2</sup> ]
$E_S$	Elastizitätsmodul des Schraubenwerkstoffs (VDI 2230-1) [N/mm <sup>2</sup> ]
$F$	Kraft, allgemein [kN]
$F_{0,2}$	Schraubenkraft an der Mindeststreckgrenze bzw. 0,2%-Dehngrenze (VDI 2230-1) [kN]
$F_{0,4,i}$	individueller Wert der Druckkraft auf den direkten Kraftanzeiger bei einem Spalt von 0,4 mm (Anzeigerdrucklast) [kN]
$F_{0,4}$	Druckkraft auf den direkten Kraftanzeiger bei einem Spalt von 0,4 mm (Anzeigerdrucklast) [kN]
$F_{0,4,reg}$	individueller Wert der Druckkraft auf den direkten Kraftanzeiger bei einem Spalt von 0,4 mm bei regulärem Nullabgleich entsprechend EN 14399-9 (Anzeigerdrucklast) [kN]
$\Delta F_{0,4}$	relative Differenz zwischen der Anzeigerdrucklast $F_{0,4,reg}$ , ermittelt entsprechend EN 14399-9, und der Anzeigerdrucklast $F_{0,4}$ , ermittelt im Rahmen der Bestimmung der Modellkennwerte [%]
$F_A$	Axialkraft (VDI 2230-1) [kN]; eine in Schraubenachse gerichtete und anteilig auf eine Schraube bezogene Komponente einer beliebig gerichteten Betriebskraft $F_B$
$F_{Aop,el}$	Axialkraft an der Abhebegrenze zum Klaffen der Trennfuge bei zentrischer Belastung unter Berücksichtigung elastischer Verformungen des direkten Kraftanzeigers [kN]; Verwendung im Kontext der Modellbildung
$F_{Aop,el-pl}$	Axialkraft an der Abhebegrenze zum Klaffen der Trennfuge bei zentrischer Belastung unter Berücksichtigung abschnittsweiser elastischer und (elastisch-)plastischer Verformungen des direkten Kraftanzeigers [kN]; Verwendung im Kontext der Modellbildung
$F_{Aop,pl}$	Axialkraft an der Abhebegrenze zum Klaffen der Trennfuge bei zentrischer Belastung unter Berücksichtigung (elastisch-)plastischer Verformungen des direkten Kraftanzeigers [kN]; Verwendung im Kontext der Modellbildung
$F_B$	beliebig gerichtete Betriebskraft an einer Verbindung (VDI 2230-1) [kN]

$F_b$	Schraubenkraft während der Prüfung (EN 14399) [kN]
$F_{bi}$	individueller Wert der Schraubenkraft in Beziehung zu einem gegebenen Mutterdrehwinkel, Anziehdrehmoment, einer Schraubenverlängerung oder Mindestanzahl von Sperrweiten einer Fühllehre (EN 14399-2) [kN]
$F_{bi,max}$	individueller Wert der höchsten Schraubenkraft bei der Prüfung (EN 14399-2) [kN]
$F_{flat}$	Druckkraft zum vollständigen Abplatten der Überstände des direkten Kraftanzeigers in der Modellbildung [kN]; zweiter Knickpunkt in der modellierten elastisch-plastischen Spalt-Druckkraft-Kurve
$F_K$	Klemmkraft (VDI 2230-1) [kN]
$F_{KR}$	Restklemmkraft in der Trennfuge bei Ent- bzw. Belastung durch $F_{PA}$ und nach dem Setzen im Betrieb (VDI 2230-1) [kN]
$F_M$	Montagevorspannkraft (VDI 2230-1) [kN]
$F_{m,min}$	Mindestbruchkraft einer Schraube (ISO 898-1) [kN]
$F_{mS}$	Bruchkraft des freien belasteten Schraubengewindes (VDI 2230-1) [kN]
$F_p$	Mindestvorspannkraft (EN 14399-2) [kN]; entspricht $F_{p,C}$
$F_{p,C}$	Nennwert der Mindestvorspannkraft von $0,7 f_{ub} A_s$ (EN 1993-1-8) [kN]
$F_{p,C}^*$	Nennwert der Regelvorspannkraft (DIN EN 1993-1-8/NA) [kN]
$F_{p,Cd}$	Bemessungswert der Mindestvorspannkraft (EN 1993-1-8) [kN]
$F_{PA}$	Anteil der Axialkraft, der die Belastung der verspannten Teile verändert, Plattenzusatzkraft (VDI 2230-1) [kN]
$F_s$	einwirkende Abscherkraft auf eine Schraube <i>{shear force in a bolt}</i> (BS 5950-1) [kN]
$F_S$	Schraubenkraft (VDI 2230-1) [kN]
$F_{S,act}$	(aktuelle) Schraubenkraft unter einer einwirkenden Betriebsbeanspruchung [kN]; Verwendung im Kontext der Modellbildung; wird ggfs. als neue maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ erfasst
$F_{S,DMS}$	Schraubenkraft, gemessen durch einen im Schraubenschaft implantierten Dehnungsmessstreifen (Bolzen-DMS) [kN]
$F_{S,ini}$	Vorspannkraft (Schraubenkraft) unmittelbar vor Beginn des Bauteil-Zugversuchs [kN]; entspricht der ggfs. um den Setzkraftverlust $F_Z$ reduzierten Montagevorspannkraft $F_M$
$F_{S,KMD}$	Schraubenkraft, gemessen durch den Kraftaufnehmer einer Prüfmaschine [kN]
$F_{S,max}$	maximale Schraubenkraft innerhalb der gesamten zurückliegenden Belastungsgeschichte [kN]; entspricht ohne Betriebsbeanspruchung der Montagevorspannkraft $F_M$ oder resultiert aus der Betriebsbeanspruchung infolge der Schraubenzusatzkraft

$F_{S,min}$	minimale Schraubenkraft, d. h. verbleibende Vorspannkraft (Restvorspannkraft), nach Rücknahme einer Betriebsbeanspruchung [kN]; Verwendung im Kontext der Bauteil-Zugversuche; siehe auch $F'_V$
$F_{S,Rd}$	Bemessungswert des Gleitwiderstandes einer Schraube im Grenzzustand der Tragfähigkeit (EN 1993-1-8) [kN]
$F_{S,Rd,ser}$	Bemessungswert des Gleitwiderstandes einer Schraube im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (EN 1993-1-8) [kN]
$F_{S,Rd,v}$	Bemessungswert des Gleitwiderstandes einer Schraube unter reiner Scherbeanspruchung im Grenzzustand der Tragfähigkeit [kN]
$F_{S,Rd,vt}$	Bemessungswert des Gleitwiderstandes einer Schraube unter kombinierter Scher- und Zugbeanspruchung im Grenzzustand der Tragfähigkeit [kN]
$F_{SA}$	axiale Schraubenzusatzkraft (VDI 2230-1) [kN]
$F_{t,Ed}$	Bemessungswert der einwirkenden Zugkraft auf eine Schraube im Grenzzustand der Tragfähigkeit (EN 1993-1-8) [kN]
$F_{t,Ed}$	Bemessungswert der einwirkenden Zugkraft auf eine Schraube im Grenzzustand der Tragfähigkeit (EN 1993-1-8) [kN]
$F_{t,Ed,ser}$	Bemessungswert der einwirkenden Zugkraft auf eine Schraube im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (EN 1993-1-8) [kN]
$F_{t,Rd}$	Bemessungswert der Zugtragfähigkeit einer Schraube (EN 1993-1-8) [kN]
$F_{tot}$	einwirkende Zugkraft auf eine Schraube unter Berücksichtigung von Abstützkräften <i>{total applied tension in the bolt}</i> (BS 5950-1) [kN]
$F_{ub}$	Nennwert der Bruchkraft von Schrauben [kN]
$F'_V$	verbleibende Vorspannkraft (Restvorspannkraft) nach Rücknahme einer Betriebsbeanspruchung in Form eines Lastwechsels [kN]; Verwendung im Kontext der Modellbildung; siehe auch $F_{S,min}$
$F_V$	Vorspannkraft, allgemein (VDI 2230-1) [kN]
$F_{y,k}$	Charakteristischer Wert der Schraubenkraft an der Streckgrenze [kN]
$F'_Z$	Vorspannkraftverlust durch plastische Verformungen des direkten Kraftanzeigers unter einer Betriebsbeanspruchung [kN]; Verwendung im Kontext der Modellbildung
$F_Z$	Vorspannkraftverlust infolge Setzens (Setzkraftverlust) im Betrieb (VDI 2230-1) [kN]; hier ausschließlich zwischen dem Abschluss der Montage ( $F_M$ ) und dem Beginn der Betriebsbeanspruchung ( $F_A$ )
$f$	elastische Längenänderung unter einer Kraft $F$ [mm]
$f_P$	elastische Längenänderung der verspannten Teile [mm]
$f_{PA}$	elastische Längenänderung der verspannten Teile durch $F_{PA}$ (VDI 2230-1) [mm]
$f_{PM}$	elastische Verkürzung der verspannten Teile durch $F_M$ (VDI 2230-1) [mm]



$f_{PM,DTI}$	elastisch-plastische Verkürzung der verspannten Teile einschließlich des direkten Kraftanzeigers durch $F_M$ [mm]
$f_S$	elastische Längenänderung der Schraube [mm]
$f_{SA}$	elastische Verlängerung der Schraube durch $F_{SA}$ (VDI 2230-1) [mm]
$f_{SM}$	elastische Verlängerung der Schraube durch $F_M$ (VDI 2230-1) [mm]
$f_{ub}$	Nennwert der Zugfestigkeit von Schrauben (EN 1993-1-8) [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_V$	axiale Verschiebung der Schrauben- bzw. der Mutterauflagefläche infolge der Vorspannkraft (VDI 2230-1) [mm]
$f_{VK}$	axiale Verschiebung des Krafteinleitungsorts infolge der Vorspannkraft (VDI 2230-1) [kN]
$f_{yb}$	Nennwert der Streckgrenze von Schrauben (EN 1993-1-8) [N/mm <sup>2</sup> ]
$h$	Dicke einer flachen Scheibe (EN 14399-6) [mm]
$h$	Höhe, allgemein (VDI 2230-1) [mm]
$h_1$	Werkstoffdicke des direkten Kraftanzeigers (EN 14399-9) [mm]
$h_2$	Höhe über den Überständen des direkten Kraftanzeigers (EN 14399-9) [mm]
$h_3$	Höhe der Überstände des direkten Kraftanzeigers (EN 14399-9) [mm]
$h_{flat}$	Spaltweite des direkten Kraftanzeigers bei der Druckkraft $F_{flat}$ [mm]; Verwendung im Kontext der Modellbildung; zweiter Knickpunkt in der modellierten elastisch-plastischen Spalt-Druckkraft-Kurve
$h_{flat,2.5}$	Spaltweite des direkten Kraftanzeigers bei der Druckkraft von $2,5 F_{p,C}$ [mm]; Verwendung im Kontext der Modellbildung; Referenzpunkt des dritten Kurvenabschnitts in der modellierten elastisch-plastischen Spalt-Druckkraft-Kurve
$h_{gap}$	Spaltweite [mm]; entspricht der Höhe der (verformten) Überstände
$h_{gap,0.8}$	Spaltweite des direkten Kraftanzeigers bei der Druckkraft von $0,8 F_{p,C}$ [mm]; Verwendung im Kontext der Modellbildung; erster Knickpunkt in der modellierten elastisch-plastischen Spalt-Druckkraft-Kurve
$h_{gap,inf}$	Größte untere Schranke der Spaltweite am individuellen Spalt (Minimalhöhe des Spaltes) [mm]
$h_{gap,inf,i}$	Individueller Wert der größten unteren Schranke der Spaltweite eines Spaltes (Minimalhöhe des Spaltes) [mm]
$h_{gap,inf,m}$	Mittelwert aller größten unteren Schranken der Spaltweite am individuellen Spalt (Minimalhöhe des Spaltes) [mm]
$h_{gap,ini}$	Spaltweite des unbelasteten direkten Kraftanzeigers [mm]; Verwendung im Kontext der Modellbildung; entspricht der Höhe der unverformten Überstände
$h_{gap,m}$	Mittelwert aller größten unteren Schranken und aller kleinsten oberen Schranken der Spaltweiten (gemittelte Höhe aller Spalte) [mm]

---

$h_{\text{gap,sup}}$	Kleinste obere Schranke der Spaltweite am individuellen Spalt (Maximalhöhe des Spaltes) [mm]
$h_{\text{gap,sup,i}}$	Individueller Wert der kleinsten oberen Schranke der Spaltweite eines Spaltes (Maximalhöhe des Spaltes) [mm]
$h_{\text{gap,sup,m}}$	Mittelwert aller kleinsten oberen Schranken der Spaltweite am individuellen Spalt (Maximalhöhe des Spaltes) [mm] $K_s$ Beiwert für die Art des Schraubenlochs { <i>coefficient allowing for the type of hole</i> } (BS 5950-1) [–]
$k$	$k$ -Faktor (EN 14399-2) [–]
$k_2$	Beiwert für die Beanspruchbarkeit einer Schraube auf Zug (EN 1993-1-8) [–]
$k_i$	individueller Wert des $k$ -Faktors (EN 14399-2) [–]
$k_m$	Mittelwert des $k$ -Faktors (EN 14399-2) [–]
$k_s$	Beiwert für die Form und Ausrichtung des Schraubenlochs (EN 1993-1-8) [–]
$l_A$	Länge zwischen Grundkörper und Krafteinleitungspunkt K im Anschlusskörper (VDI 2230-1) [mm]
$l_g$	Abstand von der Auflagefläche bis zum ersten vollen Gewindegang (ISO 225) [mm]
$l_G$	Ersatzdehnlänge für die Verformung des eingeschraubten Gewindes (VDI 2230-1) [mm]
$l_{g,\text{max}}$	maximaler Abstand von der Auflagefläche bis zum ersten vollen Gewindegang [mm]
$l_{\text{Gew}}$	Länge des freien belasteten Gewindes (VDI 2230-1) [mm]
$l_K$	Klemmlänge (VDI 2230-1) [mm]
$l_M$	Ersatzdehnlänge für die Verformung der Mutter bzw. des Einschraubgewindes (VDI 2230-1) [mm]
$l_{\text{nom}}$	Nennlänge einer Schraube [mm]
$l_s$	Schaftlänge (ISO 225) [mm]
$l_{s,\text{min}}$	minimale Schaftlänge [mm]
$l_{\text{Sch}}$	Länge des Schraubenschaftes [mm]
$l_{sK}$	Ersatzdehnlänge für die Verformung des Schraubenkopfs (VDI 2230-1) [mm]
$M$	Anziehdrehmoment, aufgebracht während der Prüfung (EN 14399-2) [Nm]
$M$	Moment, allgemein (VDI 2230-1) [Nm]
$M_A$	Anziehdrehmoment bei der Montage zum Vorspannen einer Schraube auf $F_M$ (VDI 2230-1) [Nm]
$M_G$	im Gewinde wirksamer Teil des Anziehdrehmoments (Gewindemoment) (VDI 2230-1) [Nm]

$M_i$	individueller Wert des Anziehdrehmoments, aufgebracht während des Versuchs (EN 14399-2) [Nm]
$M_i$	individueller Wert des Anziehdrehmoments, bezogen auf $F_{p,c}$ (EN 1090-2) [Nm]
$M_K$	Reibungsmoment in der Kopf- oder Mutterauflage (Kopfreibmoment) (VDI 2230-1) [Nm]
$M_m$	Mittelwert der Werte für $M_i$ (EN 1090-2) [Nm]
$M_{r,1}$	Referenz-Drehmoment mit $k_m$ für $k$ -Klasse K1 (EN 1090-2) [Nm]
$M_{r,2}$	Referenz-Drehmoment mit $k_m$ für $k$ -Klasse K2 (EN 1090-2) [Nm]
$M_{r,i}$	Referenz-Drehmoment (EN 1090-2) [Nm]
$M_{r,test}$	Referenz-Drehmoment mit $k_m$ ermittelt aus Versuchen (EN 1090-2) [Nm]
$n$	Anzahl der Gleitfugen (EN 1993-1-8) [-]
$n$	Krafteinleitungsfaktor (VDI 2230-1) [-]
$n_{gauge}$	Anzahl der Sperrweiten der Fühllehre
$n_{gauge,min}$	Mindestanzahl der Sperrweiten der Fühllehre
$P$	Steigung des Gewindes (VDI 2230-1) [mm]
$P$	Teilung des Gewindes (DIN 2244) [mm]; bei eingängigen Gewinden sind Teilung $P$ und Steigung $Ph$ identisch ( $P = Ph$ )
$P_o$	Mindestvorspannkraft { <i>minimum shank tension</i> } (Definition nach BS 4604, Formelzeichen nach BS 5950-1) [kN]
$P_{sL}$	Gleitwiderstand einer vorgespannten Schraube { <i>slip resistance provided by a preloaded bolt</i> } (BS 5950-1) [kN]
$P_{sL,SLS}$	Gleitwiderstand einer vorgespannten Schraube im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit [kN]; siehe auch $P_{sL}$
$P_{sL,ULS}$	Gleitwiderstand einer vorgespannten Schraube im Grenzzustand der Tragfähigkeit [kN]; siehe auch $P_{sL}$
$P_{sL,v}$	Gleitwiderstand einer vorgespannten Schraube unter reiner Scherbeanspruchung [kN]
$P_{sL,vt}$	Gleitwiderstand einer vorgespannten Schraube unter kombinierter Scher- und Zugbeanspruchung [kN]
$P_t$	Zugtragfähigkeit einer Schraube { <i>tension capacity of a bolt</i> } (BS 5950-1) [kN]
$p_t$	„Bemessungswert“ der Zugfestigkeit einer Schraube { <i>tension strength of a bolt</i> } (BS 5950-1) [N/mm <sup>2</sup> ]
$R$	Spannweite, allgemein ( $X_{max} - X_{min}$ )
$R_m$	Zugfestigkeit (ISO 898-1) (N/mm <sup>2</sup> )
$t$	Zeit

---

$t_{\text{gauge}}$	Dicke der Fühllehre [mm]
$\Sigma t$	Klemmlänge (EN 14399-2) [mm]
$U_b$	Mindestzugfestigkeit einer Schraube { <i>minimum tensile strength of a bolt</i> } (BS 5950-1) [N/mm <sup>2</sup> ]
$u_{\text{global}}$	Kolbenweg der Zug-Druck-Prüfmaschine [mm]
$V$	Variationskoeffizient, allgemein [–]
$V_k$	Variationskoeffizient der $k_i$ -Werte (EN 14399-2) [–]
$w$	Verbindungskoeffizient für die Art der Schraubenverbindung (VDI 2230-1) [–]
$y$	Durchmesser Verhältnis (VDI 2230-1) []
$y_{\text{SV}}$	relativer Vorspannkraftverlust infolge Setzens für die Schraubenverbindung ohne DTI (Funktion in Abhängigkeit von der Zeit $t$ ) [%]
$y_{\text{SV+DTI}}$	relativer Vorspannkraftverlust infolge Setzens für die Schraubenverbindung mit DTI (Funktion in Abhängigkeit von der Zeit $t$ ) [%]
$\Delta y_{\text{DTI}}$	relativer Vorspannkraftverlust infolge Setzens durch den direkten Kraftanzeiger (Funktion in Abhängigkeit von der Zeit $t$ ) [%]
$\beta$	Koeffizient $\beta$ der Regressionsfunktion [kN <sup>-1</sup> ]
$\beta_L$	Längenverhältnis (VDI 2230-1) [–]
$\gamma_{\text{M2}}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit von Schrauben (EN 1993-1-8) [–]
$\gamma_{\text{M3}}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Gleitfestigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Kategorie C) (EN 1993-1-8) [–]
$\gamma_{\text{M3,ser}}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Gleitfestigkeit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (Kategorie B) (EN 1993-1-8) [–]
$\gamma_{\text{M7}}$	Teilsicherheitsbeiwert für die Vorspannung hochfester Schrauben (EN 1993-1-8) [–]
$\delta$	elastische Nachgiebigkeit, allgemein (VDI 2230-1) [mm/N]
$\delta_{2\text{CD},i}$	individueller Wert der linear-elastischen Nachgiebigkeit des direkten Kraftanzeigers zwischen den Auswertepunkten 2C und 2D [mm/N]
$\delta_{\text{DTI,nom}}$	Nennwert der elastischen Nachgiebigkeit des direkten Kraftanzeigers mit vollständig abgeflachten Überständen [mm/N]
$\delta_{\text{el}}$	elastische Nachgiebigkeit der flachen Scheibe [mm/N]
$\delta_{\text{flat,nom}}$	Nennwert der elastischen Nachgiebigkeit des direkten Kraftanzeigers mit vollständig abgeflachten Überständen in der Modellbildung [mm/N]; entspricht $\delta_{\text{DTI,nom}}$ aus der Auswertung der Drucklastversuche
$\delta_{\text{flat,pl}}$	elastisch-plastische Nachgiebigkeit des direkten Kraftanzeigers im Bereich des geschlossenen Spaltes zwischen den Auswertepunkten 2B <sub>2.0</sub> (2,0 $F_{\text{p,c}}$ ) und 2B <sub>2.5</sub> (2,5 $F_{\text{p,c}}$ ) [mm/N]

$\delta_G$	elastische Nachgiebigkeit des eingeschraubten Gewindekerns (VDI 2230-1) [mm/N]
$\delta_{\text{gap,el}}$	elastische Nachgiebigkeit des direkten Kraftanzeigers im Bereich des offenen Spaltes in Abhängigkeit von der maximal eingeleiteten Druckkraft [mm/N]
$\delta_{\text{gap,pl}}$	elastisch-plastische Nachgiebigkeit des direkten Kraftanzeigers im Bereich des offenen Spaltes zwischen den Auswertepunkten $2B_{1,0}$ ( $1,0 F_{p,c}$ ) und $2B_{1,2}$ ( $1,2 F_{p,c}$ ) [mm/N]
$\delta_{\text{Gew}}$	elastische Nachgiebigkeit des nicht eingeschraubten belasteten Gewindes (VDI 2230-1) [mm/N]
$\delta_{\text{ini,pl}}$	elastisch-plastische Nachgiebigkeit des direkten Kraftanzeigers im Bereich des offenen Spaltes zwischen dem unverformten Zustand der Überstände und einer Druckkraft von $0,8 F_{p,c}$ [mm/N]
$\delta_M$	elastische Nachgiebigkeit des Mutter- bzw. Einschraubgewindebereichs und der verformten Gewindezähne (VDI 2230-1) [mm/N]
$\delta_p$	elastische Nachgiebigkeit der verspannten Teile bei zentrischer Verspannung und zentrischer Belastung (VDI 2230-1) [mm/N]
$\delta_{pA}$	elastische Nachgiebigkeit der Bauteile unter Berücksichtigung des Krafteinleitungsortes unter Betriebsbeanspruchung (VDI 2230-1) [mm/N]
$\delta_{pM}$	elastische Nachgiebigkeit der Bauteile und ggfs. flachen Scheiben bei der Montage (VDI 2230-1) [mm/N]
$\delta_{pM,el}$	elastische Nachgiebigkeit des direkten Kraftanzeigers zusammen mit den Bauteilen und flachen Scheiben in Abhängigkeit von der maximalen Schraubenkraft bei der Montage [mm/N]
$\delta_{pM,flat,pl}$	elastisch-plastische Nachgiebigkeit des direkten Kraftanzeigers zusammen mit den Bauteilen und flachen Scheiben nach dem Schließen aller Spalte bei der Montage [mm/N]
$\delta_{pM,gap,pl}$	elastisch-plastische Nachgiebigkeit des direkten Kraftanzeigers zusammen mit den Bauteilen und flachen Scheiben im Bereich der Mindestvorspannkraft bei der Montage [mm/N]
$\delta_{pM,ini,pl}$	elastisch-plastische Nachgiebigkeit des direkten Kraftanzeigers zusammen mit den Bauteilen und flachen Scheiben im Anfangsbereich der Montage [mm/N]
$\delta_S$	elastische Nachgiebigkeit der Schraubengarnitur (VDI 2230-1) [mm/N]
$\delta_{SA,el}$	elastische Nachgiebigkeit des direkten Kraftanzeigers zusammen mit der Schraubengarnitur, den flachen Scheiben und anteilmäßig den Bauteilen in Abhängigkeit von der maximalen Schraubenkraft unter Betriebsbeanspruchung [mm/N]
$\delta_{SA,flat,pl}$	elastisch-plastische Nachgiebigkeit des direkten Kraftanzeigers zusammen mit der Schraubengarnitur, den flachen Scheiben und anteilmäßig den Bauteilen unter Betriebsbeanspruchung nach dem Schließen aller Spalte [mm/N]

$\delta_{SA,gap,pl}$	elastisch-plastische Nachgiebigkeit des direkten Kraftanzeigers zusammen mit der Schraubengarnitur, den flachen Scheiben und anteilmäßig den Bauteilen unter Betriebsbeanspruchung bei vorhandenem Restspalt [mm/N]
$\delta_{Sch}$	elastische Nachgiebigkeit des Schraubenschaftes [mm/N]
$\delta_{setup}$	Nennwert der elastischen Nachgiebigkeit des Versuchsaufbaus im Drucklastversuch [mm/N]
$\delta_{setup,i}$	individueller Wert der elastischen Nachgiebigkeit des Versuchsaufbaus im Drucklastversuch [mm/N]
$\delta_{Shb}$	elastische Nachgiebigkeit der flachen Scheibe [mm/N]
$\delta_{SK}$	elastische Nachgiebigkeit des Schraubenkopfs (VDI 2230-1) [mm/N]
$\delta_{SM}$	elastische Nachgiebigkeit der Schraubengarnitur bei der Montage [mm/N]
$\varepsilon$	elastische Dehnung des Dehnungsmessstreifens (Bolzen-DMS) [mm/m]
$\theta_{pi}$	individueller Wert des Drehwinkels $\theta$ , bei dem die Schraubenkraft das erste Mal den Wert $F_p$ erreicht (EN 14399-2) [°]
$\theta_{2i}$	individueller Wert des Drehwinkels $\theta$ , bei dem der Versuch beendet wird (EN 14399-2) [°]
$\Delta\theta_{2,min}$	Mindestwert der Differenz $\Delta\theta_{2i}$ der Drehwinkel (EN 14399-2) [°]
$\Delta\theta_{2i}$	individuelle Differenz der Drehwinkel ( $\theta_{2i} - \theta_{pi}$ ) (EN 14399-2) [°]
$\Delta\theta_{KV}$	festgelegter Weiterdrehwinkel auf den gedrehten Teil der Garnitur als zweiter Anziehschritt für das kombinierte Vorspannverfahren (EN 1090-2) [°]
$\mu$	Reibungszahl { <i>slip factor</i> } (BS 5950-1) [–]
$\mu$	Reibungszahl (EN 1993-1-8) [–]
$\mu_G$	Reibungszahl im Gewinde (VDI 2230-1) [–]
$\mu_K$	Reibungszahl in der Kopfaufgabe (VDI 2230-1) [–]
$\Phi$	Kraftverhältnis, relatives Nachgiebigkeitsverhältnis (VDI 2230-1) [–]
$\Phi_{el}$	Kraftverhältnis bzw. relatives Nachgiebigkeitsverhältnis unter Einbeziehung eines direkten Kraftanzeigers im Bereich elastischer Verformungen (Modellbildung) [–]; siehe auch $\Phi$
$\Phi_{pl}$	Kraftverhältnis bzw. relatives Nachgiebigkeitsverhältnis unter Einbeziehung eines direkten Kraftanzeigers im Bereich (elastisch-)plastischer Verformungen des direkten Kraftanzeigers (Modellbildung) [–]
$\Phi_{\Delta}$	relatives Nachgiebigkeitsverhältnis unter Einbeziehung eines direkten Kraftanzeigers für den Übergangsbereich von elastischen zu (elastisch-)plastischen Verformungen des direkten Kraftanzeigers (Modellbildung) [–]
$\varphi$	Winkel des Ersatzverformungskegels, allgemein (VDI 2230-1) [°]
$\varphi_D$	Winkel des Ersatzverformungskegels bei Durchsteckschraubverbindungen (DSV) (VDI 2230-1) [°]

## Abkürzungen

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AIJ	Architectural Institute of Japan
ASD	Allowable Strength Design
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
Av	Anziehversuch { <i>Tightening test</i> }
BCSA	British Constructional Steelwork Association Ltd.
BS	British Standard
DAS	Deutscher Ausschluß für Stahlbau
DfT	Great Britain Department for Transport
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DMS	Dehnungsmessstreifen
DSV	Deutscher Schraubenverband e. V.
DSV	Durchsteckschraubverbindung (VDI 2230-1)
DTI	Direct Tension Indicator { <i>direkter Kraftanzeiger</i> }
Dv	Drucklastversuch { <i>Compression test</i> }
ECCS	European Convention for Constructional Steelwork
EN	Europäische Norm
ESV	Einschraubverbindung (VDI 2230-1)
FEM	Finite-Elemente-Methode
FHWA	Federal Highway Administration
fix	fixiert (gehaltenes Element)
FK	Festigkeitsklasse { <i>Property class</i> }
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit { <i>Serviceability Limit State</i> }
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit { <i>Ultimate Limit State</i> }
HSFG	High Strength Friction Grip
IABSE	International Association for Bridge and Structural Engineering
IML	Institut für Metall- und Leichtbau, Universität Duisburg-Essen, Essen

---

ISO	Internationale Organisation für Normung { <i>International Organization for Standardization</i> }
JSCE	Japan Society of Civil Engineers
KMD	Kraftmessdose
LRFD	Load and Resistance Factor Design
LW	Lastwechsel
mean	Mittelwert
Mu	(Sechskant-)Mutter
RCSC	Research Council on Structural Connections (Bolt Council)
rot	rotiert (gedrehtes Element)
SAE	Society of Automotive Engineers
SCI	Steel Construction Institute
Shb	Scheibe, flach und ggfs. mit Fase(n)
Shr	(Sechskant-)Schraube
SLS	Serviceability Limit State { <i>Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit</i> }
SV	Schraubenverbindung
ULS	Ultimate Limit State { <i>Grenzzustand der Tragfähigkeit</i> }
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
Vgl	Vergleich { <i>comparison</i> } (Vergleichsgruppe mit vorgespannten Verbindungen ohne DTI)
Zv	Bauteil-Zugversuch { <i>Component tensile test</i> }



## Bildnachweis

Bild 1.1 (a) und (b),

*Ausführung geschraubter Verbindungen unter Baustellenbedingungen, Fotos © Joseph A. Blum*

PEOPLE & WORK

JOSEPH A. BLUM PHOTOGRAPHY

3268 FOLSOM STREET

SAN FRANCISCO, CA 94110-5209

415-648-0474 748-1394 (mobile)

ALL IMAGES © JOSEPH A. BLUM

<http://josephablumphotography.com>

Bild 6.4 (a), (b) und (c),

*Inspektion und Instandsetzung, Landmarke „Der Tetraeder“ Bottrop, Fotos (a), (b) und (c) © Constantin Verwiebe, (d) und (e) © Christina Renner*

Prof. Dr.-Ing. Constantin Verwiebe

Bauingenieur, Beratender Ingenieur

Schweißfachingenieur / International Welding Engineer

Ö.b.u.v. Sachverständiger der Ingenieurkammer-Bau NRW für Dynamik und Windingenieurtechnik schwingungsanfälliger Bauwerke

Wiedstraße 15

47799 Krefeld

T 02151-3694333 und 0172-2407333

F 02151-3694334

[info@verwiebe.com](mailto:info@verwiebe.com)

<http://www.verwiebe.com>

Bild 6.4 (d) und (e),

*Inspektion und Instandsetzung, Landmarke „Der Tetraeder“ Bottrop, Fotos (a), (b) und (c) © Constantin Verwiebe, (d) und (e) © Christina Renner*

Christina Renner

Bottrop



# Abbildungen

Bild 1.1.	Ausführung geschraubter Verbindungen unter Baustellenbedingungen, Fotos © Joseph A. Blum .....	1
Bild 1.2.	Schritte der experimentellen Untersuchungen .....	3
Bild 2.1.	Federmodell der vorgespannten Schraubenverbindung bei der Montage.....	8
Bild 2.2.	Verlängerung-Kraft-Diagramme für Schraube und Bauteile mit Vorspannung im elastischen Bereich(schematisch) .....	9
Bild 2.3.	Verspannungsschaubild für den Montagezustand einer zentrisch verspannten Schraubenverbindung (schematisch) .....	10
Bild 2.4.	Verspannungsschaubild für den Betriebszustand einer zentrisch verspannten und zentrisch belasteten Schraubenverbindung (schematisch) .....	10
Bild 2.5.	Schaubild für den Betriebszustand einer nichtvorgespannten und zentrisch belasteten Schraubenverbindung (schematisch) .....	11
Bild 2.6.	Betriebskraft-Schraubenkraft-Diagramm von zentrisch belasteten, vorgespannten und nichtvorgespannten Schraubenverbindungen (schematisch) .....	12
Bild 2.7.	Last-Verformung-Verhalten von Scherverbindungen (schematisch) in Anlehnung an SCHMIDT [Sc91] .....	13
Bild 2.8.	Kategorien von Schraubenverbindungen nach EN 1993-1-8 und Zweck der Vorspannung nach SCHMIDT [SS11], [IML] .....	14
Bild 2.9.	Vorspannbare Schraubengarnituren M20 × 80 – 10.9/10 nach EN 14399: HR-Garnitur mit DTI (a), HR-Garnitur (b) und (d), HV-Garnitur (c), HRC-Garnitur (e).....	16
Bild 2.10.	Anziehdrehmoment-Schraubenkraft-Diagramm, Ermittlung des k-Faktors.....	22
Bild 2.11.	Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm, Eignungsprüfung zum Vorspannen.....	23
Bild 2.12.	Bruch einer HV-Schraube beim Anziehen im ersten tragenden Gewindegang .....	24
Bild 2.13.	Drehwinkel-Anziehdrehmoment-Diagramm, Drehmomentverfahren .....	32
Bild 2.14.	Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm, Drehmomentverfahren .....	32

Bild 2.15.	Drehwinkel-Anziehdrehmoment-Diagramm, kombiniertes Vorspannverfahren .....	33
Bild 2.16.	Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm, kombiniertes Vorspannverfahren .....	33
Bild 2.17.	Direkter Kraftanzeiger, mutterseitige Scheibe und Anwendung der Fühllehre.....	38
Bild 2.18.	Anziehen mit DTI: zusammengefügt von Hand (a), vorgespannt im zweiten Anziehschritt bis Fühllehren-Kriterium (b) .....	39
Bild 2.19.	Überprüfen des Spaltes des direkten Kraftanzeigers entsprechend EN 1090-2.....	40
Bild 2.20.	Konfigurationen von HV-Garnituren mit direkten Kraftanzeigern .....	42
Bild 2.21.	Konfigurationen von HR-Garnituren (8.8) mit direkten Kraftanzeigern – Drehen der Komponente gegenüber dem direkten Kraftanzeiger .....	43
Bild 2.22.	Konfigurationen von HR-Garnituren (8.8) mit direkten Kraftanzeigern – Drehen der Komponente auf dem direkten Kraftanzeiger .....	43
Bild 2.23.	Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm, Anziehen mit DTI im Vergleich zum Anziehen ohne DTI entsprechend Bild 2.11 .....	44
Bild 2.24.	Anziehdrehmoment-Schraubenkraft-Diagramm, Anziehen mit DTI im Vergleich zum Anziehen ohne DTI entsprechend Bild 2.10 .....	45
Bild 3.1.	Direkter Kraftanzeiger entsprechend der Patentschrift von TURNER [Tu62] .....	49
Bild 3.2.	Anwendungsregeln für direkte Kraftanzeiger entsprechend [BP78] .....	50
Bild 3.3.	(a) Vorspannkontrollelement für Schraubanker (DE4421959 A1) [Ha94], (b) Lastanzeigende Scheibe (EP2633201 B1) [ADS11].....	54
Bild 3.4.	(a) Zwischenlegscheibe für eine Schraubverbindung (DE4307059 C1) [A093], (b) Zwischenlegscheibe für eine Schraubverbindung mit Mitteln zum Anzeigen der Anzugskraft einer Schraube (DE4429082 C2) [A094] .....	54
Bild 3.5.	Anordnung zur Messung und Überprüfung der Spannkraft einer Schraubenverbindung (DE2939096 A1) [MNC79] .....	55
Bild 3.6.	Streuung der Vorspannkraft für das Verfahren mit direkten Kraftanzeigern nach EN 14399-9 [Be12] .....	62
Bild 3.7.	Prüfkörper mit geringer (a) und hoher (b) Steifigkeit [SI82] .....	66

Bild 3.8.	Betriebskraft-Schraubenkraft-Diagramme, Prüfungen Nr. 1 und 2 (a) sowie Nr. 3 (Schraube 1) (b) [SI82].....	69
Bild 3.9.	Betriebskraft-Schraubenkraft-Diagramme, Prüfungen Nr. 3 (Schraube 2) (a) und Nr. 4 (Schraube 1) (b) [SI82] .....	69
Bild 3.10.	Spalt-Schraubenkraft-Diagramm [SNG94] .....	72
Bild 3.11.	Vorspannen mit direktem Kraftanzeiger unter dem fixierten Schraubenkopf (Shr.fix) [DLF96] .....	74
Bild 3.12.	Vorspannen mit direktem Kraftanzeiger unter der gedrehten Mutter (Mu.rot) [DLF91] .....	75
Bild 3.13.	Drucklastversuch nach ASTM F959-90 (a) und ASTM F959-96 (b) [SNG99] .....	77
Bild 3.14.	Spalt-Kraft-Diagramme (normal/wie hergestellt) [SNG99] .....	78
Bild 3.15.	Kumulierte Summenhäufigkeit der Kräfte, um das Fülllehren-Kriterium zu erfüllen [CRL12] .....	80
Bild 3.16.	Zeit- Vorspannkraft-Diagramm (a) und relativer Vorspannkraftverlust nach 42 Tagen für unterschiedliche DTI (b) [RBY14] .....	82
Bild 3.17.	Relativer Vorspannkraftverlust nach 42 Tagen für unterschiedliche Schraubendurchmesser (a) und unterschiedliche Klemmlängen (b) [RBY14] .....	82
Bild 3.18.	(a) Direct Tension Indicator Washer (US5015132 A) [TH90], (b) Direct tension indicator washer(US5370483 A) [HL93] .....	87
Bild 3.19.	(a) Direct tension indicator washer (US5667346 A) [Sh96], (b) Load indicating fastener and method of manufacture (US7635243 B2) [TSS06] .....	88
Bild 3.20.	Direct tension indicating washers (US5769581 A) [WH97] .....	88
Bild 3.21.	(a) Direct multi-tension indicating washer having bumps of a first and second height (US6425718 B1) [HW00], (b) Direct tension multi-color indicating washers (US8382409 B2) [Wa10] .....	89
Bild 3.22.	Zulässige einwirkende Zugkräfte für vorgespannte Schrauben .....	101
Bild 3.23.	Empfehlungen zur konstruktiven Gestaltung im Brückenbau [BCSA10b], © The British Constructional Steelwork Association Ltd. ....	103
Bild 3.24.	Gleitwiderstand bei kombinierter Scher- und Zugbeanspruchung .....	104
Bild 3.25.	Abmessungen von direkten Kraftanzeigern entsprechend BS 7644-1 ....	105
Bild 3.26.	Überprüfen des Spaltes des direkten Kraftanzeiger entsprechend BS 7644-1 .....	108

Bild 3.27.	Maße des verformbaren scheibenförmigen direkten Kraftanzeigers entsprechend EN 14399-9 .....	110
Bild 3.28.	Schritte zur Bestimmung der Druckbelastung im Drucklastversuch entsprechend EN 14399-9 .....	111
Bild 3.29.	Spannweite der Flächenpressung in Schritt 1 des Drucklastversuchs aufgrund der geometrischen Toleranzen nach EN 14399-9 und ASTM F959M/F606M .....	113
Bild 3.30.	Montagekonfigurationen für DTI entsprechend [RCSC14] .....	117
Bild 3.31.	Anforderungen an den Drucklastversuch nach ASTM F959M .....	119
Bild 4.1.	Versuchsprogramm und Versuchsparameter .....	131
Bild 4.2.	Direkter Kraftanzeiger M16 – H8 (8.8) – unbeschichtet – Los A1 .....	134
Bild 4.3.	Direkter Kraftanzeiger M20 – H8 (8.8) – unbeschichtet – Los A2 .....	134
Bild 4.4.	Direkter Kraftanzeiger M16 – 10.9 (H10) – unbeschichtet – Los A10 .....	135
Bild 4.5.	Direkter Kraftanzeiger M16 – 10.9 (H10) – unbeschichtet – Los A11 .....	135
Bild 4.6.	Direkter Kraftanzeiger M20 – 10.9 (H10) – unbeschichtet – Los 22AA .....	135
Bild 4.7.	Maße von direkten Kraftanzeigern entsprechend EN 14399-9 (a) und ASTM F959M/ASME B18.2.6M (b) .....	137
Bild 4.8.	Garnitur Schraube/Mutter EN 14399-4 – HV – 10.9/10 – tZn – K1, M16 × 100 (a), M20 × 140 (b) .....	138
Bild 4.9.	Mutter EN 14399-4 – HV – M16 – 10 – tZn, k-Klasse K1 (a) und K0 (b) .....	138
Bild 4.10.	Mutter EN 14399-4 – HV – M20 – 10 – tZn, k-Klasse K1 (a) und K0 (b) .....	138
Bild 4.11.	Versuchsaufbau für Drucklastversuche in einer universellen Druckprüfmaschine, Druckbelastungssystem mit Lager- und Auflageblöcken (a), Anordnung für Schritt 1 (b) und Schritt 2 (c), nach [SS14] .....	142
Bild 4.12.	DTI im Drucklastversuch vor Schritt 1(a), vor Schritt 2 (b) und nach erweitertem Prüfablauf (c), exemplarisch Prüfung Nr. D05 (M16 – H8) .....	142
Bild 4.13.	Prüfablauf des Drucklastversuchs entsprechend EN 14399-9, exemplarisch für Prüfung Nr. D01 (M16 – H8) .....	143
Bild 4.14.	Spalt-Druckkraft-Diagramm für den erweiterten Prüfablauf der Drucklastprüfung, exemplarisch für die Prüfungen Nr. D01 und D05 (M16 – H8) .....	144

Bild 4.15.	Erweiterter Prüfablauf des Drucklastversuchs, exemplarisch für die Prüfungen Nr. D01 und D05 (M16 – H8) .....	145
Bild 4.16.	Zeit-Druckkraft-Diagramme, exemplarisch eine Prüfung je Serie, (a) absolute Druckkraft, (b) normierte Druckkraft.....	146
Bild 4.17.	Spalt-Druckkraft-Diagramme, exemplarisch eine Prüfung je Serie, (a) absolute Druckkraft, (b) normierte Druckkraft .....	147
Bild 4.18.	Spalt-Druckkraft-Kurven, exemplarisch eine Prüfung je Serie, mit Übergang zum vollständigen Abplatten der Überstände .....	149
Bild 4.19.	Spalt-Druckkraft-Kurven entsprechend regulärem Prüfablauf mit Leistungsanforderungen nach EN 14399-9 und ASTM F959M .....	153
Bild 4.20.	Versuchsaufbau für Anziehversuche mit DTI unter der rotierten Komponente, exemplarisch M16 – H10 – Mu.rot, nach [SS12a] und [SS14] .....	154
Bild 4.21.	Versuchsaufbau für Anziehversuche mit DTI unter der fixierten Komponente, exemplarisch M16 – H10 – Shr.fix, nach [SS14] .....	155
Bild 4.22.	Direkter Kraftanzeiger M16 – H8 (8.8) – unbeschichtet – Los A1 – nach Test.....	156
Bild 4.23.	Direkter Kraftanzeiger M20 – H8 (8.8) – unbeschichtet – Los A2 – nach Test.....	156
Bild 4.24.	Direkter Kraftanzeiger M16 – 10.9 (H10) – unbeschichtet – Los A10 – nach Test .....	157
Bild 4.25.	Direkter Kraftanzeiger M16 – 10.9 (H10) – unbeschichtet – Los A11 – nach Test .....	157
Bild 4.26.	Direkter Kraftanzeiger M20 – 10.9 (H10) – unbeschichtet – Los 22AA – n. Test .....	157
Bild 4.27.	Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm für Serie M16 – H10 – TS-A10 nach [SS14] .....	161
Bild 4.28.	Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm für Serie M20 – H10 – TS-22A nach [SS14] .....	161
Bild 4.29.	Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm für Serie M16 – H10 – TS-A10 .....	162
Bild 4.30.	Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm für Serie M20 – H10 – TS-22A .....	162
Bild 4.31.	Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm für Serie M16 – H8 – AND-A1.....	163
Bild 4.32.	Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm für Serie M20 – H8 – AND-A2.....	163
Bild 4.33.	Spalt-Kraft-Diagramm für Anziehversuche in der Montagekonfiguration Shr.fix.....	171

Bild 4.34.	Spalt-Kraft-Diagramm für Anziehversuche in der Montagekonfiguration Mu.rot.....	171
Bild 4.35.	Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M16 – H8 – AND-A1 (Av und Dv im Vergleich).....	172
Bild 4.36.	Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M16 – H10 – TS-A10 (Av und Dv im Vergleich).....	172
Bild 4.37.	Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M20 – H8 – AND-A2 (Av und Dv im Vergleich).....	173
Bild 4.38.	Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M20 – H10 – TS-22A (Av und Dv im Vergleich).....	173
Bild 4.39.	Lage des Bolzen-DMS im Schraubenschaft.....	178
Bild 4.40.	Kalibrierablauf für Prüfschrauben M16 und M20, Zeit-Kraft-Diagramm (a) und Dehnung-Kraft-Diagramm (b) .....	180
Bild 4.41.	Vorspannkörper aus zwei Bauteilen für den Bauteil-Zugversuch, vorgespannt mit einer HV-Garnitur, exemplarisch M20×110 (a) und M20×80 (b) .....	183
Bild 4.42.	Anziehen der Schraubengarnitur im Vorspannkörper in horizontaler Lage mit DTI unter dem Schraubenkopf.....	184
Bild 4.43.	Anziehen der Schraubengarnitur im Vorspannkörper in horizontaler Lage mit DTI unter der gedrehten Mutter.....	185
Bild 4.44.	Zeit-Schraubenkraft-Kurven des schrittweisen automatischen Anziehens bis zum Fühllehren-Kriterium (a) sowie des manuell gesteuerten Anziehens bis zur Mindestvorspannkraft (b) und bis zum festgelegten Vorspannkraftniveau (c) .....	186
Bild 4.45.	Vorgespannte Verbindung M20×110 mit DTI im Bauteil-Zugversuch.....	189
Bild 4.46.	Vorgespannte Verbindung mit Garnitur M20×110 mit überdrückter (a) und mit klaffender (b) Trennfuge bei axialer Zugbeanspruchung .....	189
Bild 4.47.	Zeit-Axialkraft-Diagramme der Lastkollektive der Typen 1, 2 und 3 .....	190
Bild 4.48.	Ergebnisse eines Bauteil-Zugversuchs (Nr. Z30): Zeit-Schraubenkraft-Diagramm der Montage (a), Zeit-Kraft-Diagramm bei Zugbeanspruchung (b) und normiertes Axialkraft-Schraubenkraft-Diagramm (c).....	194
Bild 4.49.	Spalt-Kraft-Diagramm für Zugversuche in der Montagekonfiguration Shr.fix.....	202
Bild 4.50.	Spalt-Kraft-Diagramm für Zugversuche in der Montagekonfiguration Mu.rot.....	202



Bild 4.51.	Relative Vorspannkraftverluste für Verbindungen mit und ohne DTI nach Abschluss des finalen Anziehschritts .....	204
Bild 4.52.	Reiner mittlerer relativer Vorspannkraftverlust des DTI, abgeschätzt durch Extrapolation der Regressionsfunktion .....	205
Bild 4.53.	Einfluss von Axialkräften auf den Erhalt der Vorspannkraft – Erläuterung der experimentellen Befunde anhand ausgewählter Prüfungen .....	208
Bild 4.54.	Relative Vorspannkraftverluste nach wechselnder Beanspruchung durch Axialkraft .....	211
Bild 4.55.	Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M16 – H8 – AND-A1 (Zv und Dv im Vergleich) .....	212
Bild 4.56.	Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M16 – H10 – TS-A10 (Zv und Dv im Vergleich) .....	212
Bild 4.57.	Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M16 – H10 – TS-A11 (Zv und Dv im Vergleich) .....	213
Bild 4.58.	Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M20 – H8 – AND-A2 (Zv und Dv im Vergleich) .....	213
Bild 4.59.	Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M20 – H8 – AND-A2 – Shr.fix (Zv und Av) .....	220
Bild 4.60.	Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M20 – H8 – AND-A2 – Mu.rot (Zv und Av) .....	220
Bild 4.61.	Relative Messabweichung zwischen einzelnen Messwerten der Prüfschrauben (DMS) und dem Kraftaufnehmer (KMD) der jeweiligen Prüfmaschine .....	223
Bild 5.1.	Verformungsbereiche und zugeordnete Querschnitte von Schraube und Mutter zur Bestimmung der elastischen Nachgiebigkeit .....	228
Bild 5.2.	Verformungskörper zur Bestimmung der elastischen Nachgiebigkeit der Bauteile gemäß VDI 2230-1 .....	230
Bild 5.3.	Spalt-Druckkraft-Kurven des Drucklastversuchs unter Berücksichtigung der elastischen Nachgiebigkeit des Versuchsaufbaus und des Abgleichwertes .....	236
Bild 5.4.	Auswertepunkte zur Ermittlung abschnittsweiser elastisch-plastischer Nachgiebigkeiten .....	239
Bild 5.5.	Auswertepunkte zur Ermittlung der lastabhängigen elastischen Nachgiebigkeiten .....	240

Bild 5.6.	Elastische Nachgiebigkeiten bei vorhandenem Spalt in Abhängigkeit der maximal eingeleiteten Druckkraft für unterschiedliche DTI .....	241
Bild 5.7.	Idealisierte Spalt-Druckkraft-Kurve des DTI der Serie M16 – H8 mit abschnittswisen (elastisch-)plastischen und elastischen Nachgiebigkeiten .....	243
Bild 5.8.	Idealisierte Spalt-Druckkraft-Kurven mit abschnittsweise (elastisch-)plastischen Nachgiebigkeiten für unterschiedliche DTI .....	243
Bild 5.9.	Ermittlung des Krafteinleitungsfaktors nach VDI 2230-1, Ermittlung aus Verformungen (a) und vereinfachte Ermittlung aus Verbindungstypen (b) .....	244
Bild 5.10.	Verspannungsschaubild für den Montagezustand mit DTI (schematisch) .....	246
Bild 5.11.	Verspannungsschaubild für den Betriebszustand mit DTI (schematisch) .....	247
Bild 5.12.	Verspannungsschaubild mit Vorspannkraftverlust $F_z$ aufgrund eines Setzbetrages $f_z$ (schematisch) .....	248
Bild 5.13.	Verspannungsschaubild für den Betriebszustand im Fall A: kein Klaffen, kein weiteres Abplatten und kein Vorspannkraftverlust, (a) $F_{S,max} > F_{Aop,el}$ und (b) $F_{S,max} < F_{Aop,el-pl}$ .....	252
Bild 5.14.	Verspannungsschaubild für den Betriebszustand im Fall E: (a) Belastung mit Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$ , (b) Entlastung mit Vorspannkraftverlust $F'_z$ .....	253
Bild 5.15.	Einfluss von Axialkräften auf den Erhalt der Vorspannkraft – Vergleich von Versuch und Modell anhand ausgewählter Prüfungen entsprechend Bild 4.53 .....	257
Bild 5.16.	Normiertes Axialkraft-Schraubenkraft-Diagramm aus Versuch und Modell für ausgewählte Prüfungen entsprechend Bild 4.53, maximale Axialkraft $F_A \leq F_{t,Rd}$ .....	258
Bild 5.17.	Normierte Axialkraft-Schraubenkraft-Diagramme aus Versuch und Modell für ausgewählte Prüfungen in Anlehnung an Bild 4.53 und Bild 5.16: (a) Prüfungen mit DTI, (b) Prüfungen ohne DTI .....	259
Bild 5.18.	Normiertes Axialkraft-Schraubenkraft-Diagramm aus Versuch und Modell für Bauteil-Zugversuch Nr. Z02 (mit DTI) .....	260
Bild 5.19.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte aus Versuch und Modell für ausgewählte Prüfungen entsprechend Bild 4.53: maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ .....	261

Bild 5.20.	Streudiagramme der normierten Schraubenkräfte aus Versuch und Modell für ausgewählte Prüfungen entsprechend Bild 4.53: (a) Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$ , (b) minimale Schraubenkraft $F_{S,min}$ .....263
Bild 5.21.	Nichtlineares Last-Verformung-Verhalten unter zentrischer Axialkraft, Verspannungsschaubild nach [Bo79] (a), Verformung der Bauteile nach [ZP04] (b) .....265
Bild 5.22.	Vorspannkraftverluste für DTI M16 – H10 – TS-A11 bei einem Lastwechsel $F_A = F_{t,Rd}$ mit $n = 1,0$ (a, b) und $n = 0,5$ (c, d) sowie $F_Z = 0$ (a, c) und $F_Z = 0,1 F_{p,c}$ (b, d) .....272
Bild 5.23.	Vorspannkraftverluste für DTI M20 – H10 – TS-22A bei einem Lastwechsel $F_A = F_{t,Rd}$ mit $n = 1,0$ (a, b) und $n = 0,5$ (c, d) sowie $F_Z = 0$ (a, c) und $F_Z = 0,1 F_{p,c}$ (b, d) .....273
Bild 5.24.	Vorspannkraftverluste für DTI M16 – H8 – AND-A1 und M20 – H8 – AND-A2 bei einem Lastwechsel $F_A = F_{t,Rd}$ mit $n = 1,0$ (a, b) und $n = 0,5$ (c, d) sowie $F_Z = 0$ (a, c) und $F_Z = 0,1 F_{p,c}$ (b, d) .....274
Bild 5.25.	Zulässige Axialkräfte für DTI M16 – H10 – TS-A11 für einen maximalen Vorspannkraftverlust von $F_Z \leq 0,05 F_{p,c}$ mit $n = 1,0$ (a, b) und $n = 0,5$ (c, d) sowie $F_Z = 0$ (a, c) und $F_Z = 0,1$ (b, d) .....276
Bild 5.26.	Zulässige Axialkräfte für DTI M20 – H10 – TS-22A für einen maximalen Vorspannkraftverlust von $F_Z \leq 0,05 F_{p,c}$ mit $n = 1,0$ (a, b) und $n = 0,5$ (c, d) sowie $F_Z = 0$ (a, c) und $F_Z = 0,1$ (b, d) .....277
Bild 5.27.	Zulässige Axialkräfte für DTI M16 – H8 – AND-A1 und M20 – H8 – AND-A2 für einen maximalen Vorspannkraftverlust von $F_Z \leq 0,05 F_{p,c}$ mit $n = 1,0$ (a, b) und $n = 0,5$ (c, d) sowie $F_Z = 0$ (a, c) und $F_Z = 0,1$ (b, d) .....278
Bild 6.1.	Behelfsbrücke, Vinckekanal Duisburg .....299
Bild 6.2.	Kesselgerüst, Kraftwerk Neurath .....299
Bild 6.3.	Tragmast, Seilbahn Koblenz .....300
Bild 6.4.	Inspektion und Instandsetzung, Landmarke „Der Tetraeder“ Bottrop, Fotos (a), (b) und (c) © Constantin Verwiebe, (d) und (e) © Christina Renner .....301
Bild A.1.	Laststufen des erweiterten Prüfablaufs, exemplarisch für die Prüfung Nr. D05 (M16 – H8) ..... A-1
Bild A.2.	Vorhandene Spalte $h_{gap}$ [mm] zu den Laststufen entsprechend Bild A.1 ..... A-1
Bild A.3.	Spalt-Druckkraft-Diagramme für Serie M16 – H8, (a) regulärer Prüfablauf, (b) erweiterter Prüfablauf..... A-2

Bild A.4.	Spalt-Druckkraft-Diagramme für Serie M16 – H10, (a) regulärer Prüfablauf, (b) erweiterter Prüfablauf.....	A-3
Bild A.5.	Spalt-Druckkraft-Diagramme für Serie M20 – H8, (a) regulärer Prüfablauf, (b) erweiterter Prüfablauf.....	A-4
Bild A.6.	Spalt-Druckkraft-Diagramme für Serie M20 – H10, (a) regulärer Prüfablauf, (b) erweiterter Prüfablauf.....	A-5
Bild C.1.	Dehnung-Kraft-Diagramme der Prüfschrauben mit Bolzen-DMS .....	C-1
Bild C.2.	Prüfvorrichtung für Bauteil-Zugversuche: (a) Montage der Bauteile, (b) Zugversuch an vorgespannten Bauteilen .....	C-2
Bild C.3.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z01 (mit DTI).....	C-4
Bild C.4.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z02 (mit DTI).....	C-6
Bild C.5.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z03 (mit DTI).....	C-8
Bild C.6.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z04 (mit DTI).....	C-10
Bild C.7.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z05 (mit DTI).....	C-12
Bild C.8.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z06 (mit DTI).....	C-14
Bild C.9.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z07 (mit DTI).....	C-16
Bild C.10.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z08 (mit DTI).....	C-18
Bild C.11.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z09 (mit DTI).....	C-20
Bild C.12.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z10 (mit DTI).....	C-22
Bild C.13.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z11 (mit DTI).....	C-24
Bild C.14.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z12 (mit DTI).....	C-26
Bild C.15.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z13 (ohne DTI) .....	C-28
Bild C.16.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z14 (ohne DTI) .....	C-30
Bild C.17.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z15 (ohne DTI) .....	C-32
Bild C.18.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z16 (ohne DTI) .....	C-34
Bild C.19.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z17 (ohne DTI) .....	C-36
Bild C.20.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z18 (ohne DTI) .....	C-38
Bild C.21.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z19 (ohne DTI) .....	C-40
Bild C.22.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z20 (mit DTI).....	C-42
Bild C.23.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z21 (mit DTI).....	C-44
Bild C.24.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z22 (mit DTI).....	C-46

Bild C.25.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z23 (mit DTI).....	C-48
Bild C.26.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z24 (mit DTI).....	C-50
Bild C.27.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z25 (mit DTI).....	C-52
Bild C.28.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z26 (mit DTI).....	C-54
Bild C.29.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z27 (mit DTI).....	C-56
Bild C.30.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z28 (mit DTI).....	C-58
Bild C.31.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z29 (mit DTI).....	C-60
Bild C.32.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z30 (mit DTI).....	C-62
Bild C.33.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z31 (mit DTI).....	C-64
Bild C.34.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z32 (ohne DTI) .....	C-66
Bild C.35.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z33 (ohne DTI) .....	C-68
Bild C.36.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z34 (ohne DTI) .....	C-70
Bild C.37.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z35 (ohne DTI) .....	C-72
Bild C.38.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z36 (ohne DTI) .....	C-74
Bild C.39.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z37 (ohne DTI) .....	C-76
Bild C.40.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z38 (ohne DTI) .....	C-78
Bild C.41.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z39 (ohne DTI) .....	C-80
Bild C.42.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z40 (mit DTI).....	C-82
Bild C.43.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z41 (mit DTI).....	C-84
Bild C.44.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z42 (mit DTI).....	C-86
Bild C.45.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z43 (mit DTI).....	C-88
Bild C.46.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z44 (mit DTI).....	C-90
Bild C.47.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z45 (mit DTI).....	C-92
Bild C.48.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z46 (mit DTI).....	C-94
Bild C.49.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z47 (mit DTI).....	C-96
Bild C.50.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z48 (mit DTI).....	C-98
Bild C.51.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z49 (mit DTI).....	C-100
Bild C.52.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z50 (mit DTI).....	C-102
Bild C.53.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z51 (mit DTI).....	C-104
Bild C.54.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z52 (mit DTI).....	C-106

Bild C.55.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z53 (mit DTI) .....	C-108
Bild C.56.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z54 (ohne DTI) .....	C-110
Bild C.57.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z55 (ohne DTI) .....	C-112
Bild C.58.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z56 (ohne DTI) .....	C-114
Bild C.59.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z57 (ohne DTI) .....	C-116
Bild C.60.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z58 (ohne DTI) .....	C-118
Bild C.61.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z59 (ohne DTI) .....	C-120
Bild C.62.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z60 (ohne DTI) .....	C-122
Bild C.63.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z61 (ohne DTI) .....	C-124
Bild C.64.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z62 (ohne DTI) .....	C-126
Bild C.65.	Schraubenkraft nach finalem Anziehschritt, Serie M16 – H8.....	C-128
Bild C.66.	Schraubenkraft nach finalem Anziehschritt, Serie M16 – H10 .....	C-128
Bild C.67.	Schraubenkraft nach finalem Anziehschritt, Serie M20 – H8.....	C-128
Bild C.68.	Vorspannkraftverluste: Serie M16 – H8 – Shr.fix .....	C-129
Bild C.69.	Vorspannkraftverluste: Serie M16 – H8 – Mu.rot .....	C-129
Bild C.70.	Vorspannkraftverluste: Serie M16 – H10 – Shr.fix .....	C-130
Bild C.71.	Vorspannkraftverluste: Serie M16 – H10 – Mu.rot .....	C-130
Bild C.72.	Vorspannkraftverluste: Serie M20 – H8 – Shr.fix .....	C-131
Bild C.73.	Vorspannkraftverluste: Serie M20 – H8 – Mu.rot .....	C-131
Bild C.74.	Vorspannkraftverluste: Serie M16 – H8/H10 – Vgl (ohne DTI) .....	C-132
Bild C.75.	Vorspannkraftverluste: Serie M20 – H8 – Vgl (ohne DTI) .....	C-132
Bild C.76.	Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M16 – H8 – AND-A1 – Shr.fix (Zv und Av) .....	C-139
Bild C.77.	Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M16 – H8 – AND-A1 – Mu.rot (Zv und Av) .....	C-139
Bild C.78.	Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M16 – H10 – TS-A10 – Shr.fix (Zv und Av) .....	C-140
Bild C.79.	Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M20 – H8 – AND-A2 – Shr.fix (Zv und Av) .....	C-141
Bild C.80.	Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M20 – H8 – AND-A2 – Mu.rot (Zv und Av) .....	C-141
Bild D.1.	Vereinfachte Abschätzung des Krafteinleitungsortes .....	D-9

Bild D.2.	Verspannungsschaubild für den Betriebszustand im Fall A: kein Klaffen, kein weiteres Abplatten und kein Vorspannkraftverlust, $F_{S,max} = F_{Aop,el} = F_{Aop,el-pl}$ .....	D-10
Bild D.3.	Verspannungsschaubild für den Betriebszustand im Fall B: mit Klaffen, kein weiteres Abplatten und kein Vorspannkraftverlust.....	D-10
Bild D.4.	Verspannungsschaubild für den Betriebszustand im Fall C: (a) Belastung mit Klaffen und weiterem Abplatten, (b) Entlastung mit Vorspannkraftverlust .....	D-11
Bild D.5.	Verspannungsschaubild für den Betriebszustand im Fall D: (a) Belastung mit weiterem Abplatten und ohne Klaffen, (b) Entlastung mit Vorspannkraftverlust .....	D-12
Bild D.6.	Verspannungsschaubild für den Betriebszustand im Fall E: (a) Belastung mit weiterem Abplatten und mit Klaffen, (b) Entlastung mit Vorspannkraftverlust (identisch mit Bild 5.14) .....	D-13
Bild D.7.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z01 (mit DTI) .....	D-15
Bild D.8.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z02 (mit DTI) .....	D-15
Bild D.9.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z03 (mit DTI) .....	D-16
Bild D.10.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z04 (mit DTI) .....	D-16
Bild D.11.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z05 (mit DTI) .....	D-17
Bild D.12.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z06 (mit DTI) .....	D-17
Bild D.13.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z07 (mit DTI) .....	D-18
Bild D.14.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z08 (mit DTI) .....	D-18
Bild D.15.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z09 (mit DTI) .....	D-19
Bild D.16.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z10 (mit DTI) .....	D-19
Bild D.17.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z11 (mit DTI) .....	D-20
Bild D.18.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z12 (mit DTI) .....	D-20
Bild D.19.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z13 (ohne DTI) .....	D-21
Bild D.20.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z14 (ohne DTI) .....	D-21
Bild D.21.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z15 (ohne DTI) .....	D-22
Bild D.22.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z16 (ohne DTI) .....	D-22
Bild D.23.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z17 (ohne DTI) .....	D-23
Bild D.24.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z18 (ohne DTI) .....	D-23
Bild D.25.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z19 (ohne DTI) .....	D-24

---

Bild D.26.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z20 (mit DTI) .....	D-24
Bild D.27.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z21 (mit DTI) .....	D-25
Bild D.28.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z22 (mit DTI) .....	D-25
Bild D.29.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z23 (mit DTI) .....	D-26
Bild D.30.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z24 (mit DTI) .....	D-26
Bild D.31.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z25 (mit DTI) .....	D-27
Bild D.32.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z26 (mit DTI) .....	D-27
Bild D.33.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z27 (mit DTI) .....	D-28
Bild D.34.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z28 (mit DTI) .....	D-28
Bild D.35.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z29 (mit DTI) .....	D-29
Bild D.36.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z30 (mit DTI) .....	D-29
Bild D.37.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z31 (mit DTI) .....	D-30
Bild D.38.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z32 (ohne DTI) .....	D-30
Bild D.39.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z33 (ohne DTI) .....	D-31
Bild D.40.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z34 (ohne DTI) .....	D-31
Bild D.41.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z35 (ohne DTI) .....	D-32
Bild D.42.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z36 (ohne DTI) .....	D-32
Bild D.43.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z37 (ohne DTI) .....	D-33
Bild D.44.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z38 (ohne DTI) .....	D-33
Bild D.45.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z39 (ohne DTI) .....	D-34
Bild D.46.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z40 (mit DTI) .....	D-34
Bild D.47.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z41 (mit DTI) .....	D-35
Bild D.48.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z42 (mit DTI) .....	D-35
Bild D.49.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z43 (mit DTI) .....	D-36
Bild D.50.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z44 (mit DTI) .....	D-36
Bild D.51.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z45 (mit DTI) .....	D-37
Bild D.52.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z46 (mit DTI) .....	D-37
Bild D.53.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z47 (mit DTI) .....	D-38
Bild D.54.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z48 (mit DTI) .....	D-38
Bild D.55.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z49 (mit DTI) .....	D-39



Bild D.56.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z50 (mit DTI) .....	D-39
Bild D.57.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z51 (mit DTI) .....	D-40
Bild D.58.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z52 (mit DTI) .....	D-40
Bild D.59.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z53 (mit DTI) .....	D-41
Bild D.60.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z54 (ohne DTI) .....	D-41
Bild D.61.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z55 (ohne DTI) .....	D-42
Bild D.62.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z56 (ohne DTI) .....	D-42
Bild D.63.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z57 (ohne DTI) .....	D-43
Bild D.64.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z58 (ohne DTI) .....	D-43
Bild D.65.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z59 (ohne DTI) .....	D-44
Bild D.66.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z60 (ohne DTI) .....	D-44
Bild D.67.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z61 (ohne DTI) .....	D-45
Bild D.68.	Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z62 (ohne DTI) .....	D-45
Bild D.69.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für alle Prüfungen mit $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ .....	D-46
Bild D.70.	Streudiagramme der Schraubenkräfte für alle Prüfungen mit $F_A \leq$ $F_{t,Rd}$ : (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA,r}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ .....	D-47
Bild D.71.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für alle Prüfungen: maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ .....	D-48
Bild D.72.	Streudiagramme der Schraubenkräfte für alle Prüfungen: (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA,r}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ .....	D-49
Bild D.73.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H8 – Shr.fix mit $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ .....	D-50
Bild D.74.	Streudiagramme für Serie M16 – H8 – Shr.fix mit $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA,r}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ .....	D-51
Bild D.75.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H8 – Mu.rot mit $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ .....	D-52
Bild D.76.	Streudiagramme für Serie M16 – H8 – Mu.rot mit $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA,r}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ .....	D-53

Bild D.77.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H10 – Shr.fix mit $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ ..... D-54
Bild D.78.	Streudiagramme für Serie M16 – H10 – Shr.fix mit $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ ..... D-55
Bild D.79.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H10 – Mu.rot mit $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ ..... D-56
Bild D.80.	Streudiagramme für Serie M16 – H10 – Mu.rot mit $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ ..... D-57
Bild D.81.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M20 – H8 – Shr.fix mit $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ ..... D-58
Bild D.82.	Streudiagramme für Serie M20 – H8 – Shr.fix mit $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ ..... D-59
Bild D.83.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M20 – H8 – Mu.rot mit $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ ..... D-60
Bild D.84.	Streudiagramme für Serie M20 – H8 – Mu.rot mit $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ ..... D-61
Bild D.85.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H8/H10 – Vgl (ohne DTI) mit $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ ..... D-62
Bild D.86.	Streudiagramme für Serie M16 – H8/H10 – Vgl (ohne DTI) mit $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ ..... D-63
Bild D.87.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M20 – H8 – Vgl (ohne DTI) mit $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ ..... D-64
Bild D.88.	Streudiagramme für Serie M20 – H8 – Vgl (ohne DTI) mit $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ ..... D-65
Bild D.89.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H8 – Shr.fix: maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ ..... D-66
Bild D.90.	Streudiagramme für Serie M16 – H8 – Shr.fix: (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ ..... D-67
Bild D.91.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H8 – Mu.rot: maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ ..... D-68

Bild D.92.	Streudiagramme für Serie M16 – H8 – Mu.rot: (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ .....	D-69
Bild D.93.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H10 – Shr.fix: maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ .....	D-70
Bild D.94.	Streudiagramme für Serie M16 – H10 – Shr.fix: (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ .....	D-71
Bild D.95.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H10 – Mu.rot: maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ .....	D-72
Bild D.96.	Streudiagramme für Serie M16 – H10 – Mu.rot: (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ .....	D-73
Bild D.97.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M20 – H8 – Shr.fix: maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ .....	D-74
Bild D.98.	Streudiagramme für Serie M20 – H8 – Shr.fix: (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ .....	D-75
Bild D.99.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M20 – H8 – Mu.rot: maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ .....	D-76
Bild D.100.	Streudiagramme für Serie M20 – H8 – Mu.rot: (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ .....	D-77
Bild D.101.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H8/H10 – Vgl (ohne DTI): maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ .....	D-78
Bild D.102.	Streudiagramme für Serie M16 – H8/H10 – Vgl (ohne DTI): (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ .....	D-79
Bild D.103.	Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M20 – H8 – Vgl (ohne DTI): maximale Schraubenkraft $F_{S,max}$ .....	D-80
Bild D.104.	Streudiagramme für Serie M20 – H8 – Vgl (ohne DTI): (a) normierte Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft $F_{S,min}$ .....	D-81



## **Tabellen**

Tabelle 2.1.	Anforderungen an k-Klassen nach EN 14399-1 .....	20
Tabelle 2.2.	Anforderungen an die Gebrauchseignung zum Vorspannen nach EN 14399-3, -4 und -9 und erforderliche Prüfungen.....	25
Tabelle 2.3.	Anziehverfahren und erforderliche k-Klassen nach EN 1090-2 .....	26
Tabelle 2.4.	Anziehverfahren, Anziehparameter und Anziehschritte nach EN 1090-2 .....	27
Tabelle 2.5.	Weiterdrehwinkel für das kombinierte Vorspannverfahren nach EN 1090-2 und Zuordnung der Nennlängen von HV-Schrauben nach EN 14399-4 .....	31
Tabelle 2.6.	Dicke der anzuwendenden Fühllehre entsprechend EN 14399-9 .....	40
Tabelle 3.1.	Mittlere Höhe der Spalte entsprechend BS 7644-1, Tabelle 3.....	105
Tabelle 4.1.	Versuchsarten und zugehörige Prüfteile.....	129
Tabelle 4.2.	Angegebene Produktnormen der Prüfteile .....	134
Tabelle 4.3.	Maße der direkten Kraftanzeiger (Mittelwerte).....	136
Tabelle 4.4.	Ergebnisse der Drucklastversuche.....	150
Tabelle 4.5.	Anzeigerdrucklasten bei einem Spalt von 0,4 mm aus Drucklastversuchen und Abnahmeprüfzeugnis 3.1 .....	152
Tabelle 4.6.	Dicke der eingesetzten Fühllehren in unterschiedlicher Abstufung .....	158
Tabelle 4.7.	Ergebnisse des Anziehens mit DTI, exemplarisch Anziehversuch A01 (Shr.fix) .....	165
Tabelle 4.8.	Ergebnisse des Anziehens mit DTI, exemplarisch Anziehversuch A05 (Mu.rot) .....	165
Tabelle 4.9.	Montagevorspannkkräfte bei Erreichen des Fühllehren-Kriteriums, Serien M16.....	166
Tabelle 4.10.	Kriterien zur Bewertung des Anziehens mit DTI.....	167
Tabelle 4.11.	Montagevorspannkkräfte bei Erreichen des Fühllehren-Kriteriums, Serien M20.....	167
Tabelle 4.12.	Querschnittsschwächung der Prüfschrauben mit implantierten DMS .....	179
Tabelle 4.13.	Lastkollektivform der einzelnen Bauteil-Zugversuche .....	191

Tabelle 4.14.	Ergebnisse des Anziehvorgangs mit DTI, exemplarisch für den Bauteil-Zugversuch Nr. Z30 .....	195
Tabelle 4.15.	Ergebnisse des Zugversuchs mit DTI, exemplarisch für den Bauteil-Zugversuch Nr. Z30 .....	195
Tabelle 4.16.	Abweichungen zu den Anforderungen an die Prüfung nach EN 14399-9 und -2 .....	196
Tabelle 4.17.	Montagevorspannkkräfte der Vorspannkörper M16 bei Erreichen des Fühllehren-Kriteriums .....	198
Tabelle 4.18.	Montagevorspannkkräfte der Vorspannkörper M20 bei Erreichen des Fühllehren-Kriteriums .....	199
Tabelle 4.19.	Vorspannkraftverluste nach wechselnder Beanspruchung durch Axialkraft – Prüfungen entsprechend Bild 4.53.....	208
Tabelle 4.20.	Erläuterungen und Legende zu Bild 4.53 .....	209
Tabelle 4.21.	Montagevorspannkkräfte bei Erreichen des Fühllehren-Kriteriums, Serie M20 – H8, Zusammenfassung von Anziehversuchen und Bauteil-Zugversuchen .....	219
Tabelle 5.1.	Elastische Nachgiebigkeiten der Schraubengarnituren (Auswahl) .....	229
Tabelle 5.2.	Elastische Nachgiebigkeiten der Bauteile (Auswahl).....	232
Tabelle 5.3.	Elastische Nachgiebigkeiten von flachen Scheiben .....	233
Tabelle 5.4.	Elastische Nachgiebigkeiten des Versuchsaufbaus des Drucklastversuchs .....	235
Tabelle 5.5.	Koeffizienten der Regressionsfunktionen für die elastischen Nachgiebigkeiten bei vorhandenem Spalt in Abhängigkeit der maximal eingeleiteten Druckkraft.....	241
Tabelle 5.6.	Modellkennwerte der direkten Kraftanzeiger.....	242
Tabelle 5.7.	Krafteinleitungsfaktoren für verwendete Abmessungen der Bauteil-Zugversuche.....	245
Tabelle 5.8.	Zusammensetzung der Nachgiebigkeiten für Montage und Betrieb .....	247
Tabelle 5.9.	Axialkräfte an der Abhebegrenze bei zentrischer Belastung und Kraftverhältnisse für elastische und plastische Verformungen .....	254
Tabelle 5.10.	Axiale Schraubenzusatzkräfte und zugehörige Verformungen der Schraube mit DTI in unterschiedlichen Konstellationen.....	254
Tabelle 5.11.	Zusätzliche Vorspannkraftverluste und Restvorspannkkräfte unter Verwendung eines DTI in unterschiedlichen Konstellationen .....	255
Tabelle 5.12.	Erläuterungen und Legende zu Bild 5.15 .....	257

Tabelle 5.13.	Restvorspannkräfte $F'_V$ für DTI M16 – H10 – TS-A11 nach einem Lastwechsel $F_A = F_{t,Rd}$ mit und ohne vorhergehendem Setzkraftverlust $F_Z$ .....	271
Tabelle 6.1.	Empfehlungen zur Anwendung des Verfahrens mit DTI unter Berücksichtigung der derzeitigen Regelwerke und von konstruktiven Randbedingungen .....	298
Tabelle B.1.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A01 (mit DTI) .....	B-1
Tabelle B.2.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A02 (mit DTI) .....	B-1
Tabelle B.3.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A03 (mit DTI) .....	B-2
Tabelle B.4.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A04 (mit DTI) .....	B-2
Tabelle B.5.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A05 (mit DTI) .....	B-2
Tabelle B.6.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A06 (mit DTI) .....	B-3
Tabelle B.7.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A07 (mit DTI) .....	B-3
Tabelle B.8.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A08 (mit DTI) .....	B-3
Tabelle B.9.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A09 (mit DTI) .....	B-4
Tabelle B.10.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A10 (mit DTI) .....	B-4
Tabelle B.11.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A11 (mit DTI) .....	B-4
Tabelle B.12.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A12 (mit DTI) .....	B-5
Tabelle B.13.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A13 (mit DTI) .....	B-5
Tabelle B.14.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A14 (mit DTI) .....	B-5
Tabelle B.15.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A15 (mit DTI) .....	B-6
Tabelle B.16.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A16 (mit DTI) .....	B-6
Tabelle B.17.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A17 (mit DTI) .....	B-6
Tabelle B.18.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A18 (mit DTI) .....	B-7
Tabelle B.19.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A19 (mit DTI) .....	B-7
Tabelle B.20.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A20 (mit DTI) .....	B-7
Tabelle B.21.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A21 (mit DTI) .....	B-8
Tabelle B.22.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A53 (mit DTI) .....	B-8
Tabelle B.23.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A54 (mit DTI) .....	B-8
Tabelle B.24.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A55 (mit DTI) .....	B-9
Tabelle B.25.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A56 (mit DTI) .....	B-9

---

Tabelle B.26.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A57 (mit DTI) .....	B-9
Tabelle B.27.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A58 (mit DTI) .....	B-10
Tabelle B.28.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A59 (mit DTI) .....	B-10
Tabelle B.29.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A60 (mit DTI) .....	B-10
Tabelle B.30.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A61 (mit DTI) .....	B-11
Tabelle B.31.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A62 (mit DTI) .....	B-11
Tabelle B.32.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A63 (mit DTI) .....	B-11
Tabelle B.33.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A64 (mit DTI) .....	B-12
Tabelle B.34.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A65 (mit DTI) .....	B-12
Tabelle B.35.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A66 (mit DTI) .....	B-12
Tabelle B.36.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A67 (mit DTI) .....	B-13
Tabelle B.37.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A68 (mit DTI) .....	B-13
Tabelle B.38.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A69 (mit DTI) .....	B-13
Tabelle B.39.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A70 (mit DTI) .....	B-14
Tabelle B.40.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A71 (mit DTI) .....	B-14
Tabelle B.41.	Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A72 (mit DTI) .....	B-14
Tabelle C.1.	Kalibrierwerte der Prüfschrauben mit Bolzen-DMS .....	C-1
Tabelle C.2.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z01 (mit DTI) – Anziehen .....	C-5
Tabelle C.3.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z01 (mit DTI) – Zugversuch .....	C-5
Tabelle C.4.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z02 (mit DTI) – Anziehen .....	C-7
Tabelle C.5.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z02 (mit DTI) – Zugversuch .....	C-7
Tabelle C.6.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z03 (mit DTI) – Anziehen .....	C-9
Tabelle C.7.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z03 (mit DTI) – Zugversuch .....	C-9
Tabelle C.8.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z04 (mit DTI) – Anziehen .....	C-11
Tabelle C.9.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z04 (mit DTI) – Zugversuch .....	C-11
Tabelle C.10.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z05 (mit DTI) – Anziehen .....	C-13
Tabelle C.11.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z05 (mit DTI) – Zugversuch .....	C-13
Tabelle C.12.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z06 (mit DTI) – Anziehen .....	C-15
Tabelle C.13.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z06 (mit DTI) – Zugversuch .....	C-15
Tabelle C.14.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z07 (mit DTI) – Anziehen .....	C-17



Tabelle C.15.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z07 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-17
Tabelle C.16.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z08 (mit DTI) – Anziehen .....	C-19
Tabelle C.17.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z08 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-19
Tabelle C.18.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z09 (mit DTI) – Anziehen .....	C-21
Tabelle C.19.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z09 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-21
Tabelle C.20.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z10 (mit DTI) – Anziehen .....	C-23
Tabelle C.21.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z10 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-23
Tabelle C.22.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z11 (mit DTI) – Anziehen .....	C-25
Tabelle C.23.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z11 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-25
Tabelle C.24.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z12 (mit DTI) – Anziehen .....	C-27
Tabelle C.25.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z12 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-27
Tabelle C.26.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z13 (ohne DTI) – Zugversuch .....	C-29
Tabelle C.27.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z14 (ohne DTI) – Zugversuch .....	C-31
Tabelle C.28.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z15 (ohne DTI) – Zugversuch .....	C-33
Tabelle C.29.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z16 (ohne DTI) – Zugversuch .....	C-35
Tabelle C.30.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z17 (ohne DTI) – Zugversuch .....	C-37
Tabelle C.31.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z18 (ohne DTI) – Zugversuch .....	C-39
Tabelle C.32.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z19 (ohne DTI) – Zugversuch .....	C-41
Tabelle C.33.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z20 (mit DTI) – Anziehen .....	C-43
Tabelle C.34.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z20 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-43
Tabelle C.35.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z21 (mit DTI) – Anziehen .....	C-45
Tabelle C.36.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z21 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-45
Tabelle C.37.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z22 (mit DTI) – Anziehen .....	C-47
Tabelle C.38.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z22 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-47
Tabelle C.39.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z23 (mit DTI) – Anziehen .....	C-49

Tabelle C.40.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z23 (mit DTI) – Zugversuch ....C-49
Tabelle C.41.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z24 (mit DTI) – Anziehen .....C-51
Tabelle C.42.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z24 (mit DTI) – Zugversuch ....C-51
Tabelle C.43.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z25 (mit DTI) – Anziehen .....C-53
Tabelle C.44.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z25 (mit DTI) – Zugversuch ....C-53
Tabelle C.45.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z26 (mit DTI) – Anziehen .....C-55
Tabelle C.46.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z26 (mit DTI) – Zugversuch ....C-55
Tabelle C.47.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z27 (mit DTI) – Anziehen .....C-57
Tabelle C.48.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z27 (mit DTI) – Zugversuch ....C-57
Tabelle C.49.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z28 (mit DTI) – Anziehen .....C-59
Tabelle C.50.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z28 (mit DTI) – Zugversuch ....C-59
Tabelle C.51.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z29 (mit DTI) – Anziehen .....C-61
Tabelle C.52.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z29 (mit DTI) – Zugversuch ....C-61
Tabelle C.53.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z30 (mit DTI) – Anziehen .....C-63
Tabelle C.54.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z30 (mit DTI) – Zugversuch ....C-63
Tabelle C.55.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z31 (mit DTI) – Anziehen .....C-65
Tabelle C.56.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z31 (mit DTI) – Zugversuch ....C-65
Tabelle C.57.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z32 (ohne DTI) – Zugversuch .....C-67
Tabelle C.58.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z33 (ohne DTI) – Zugversuch .....C-69
Tabelle C.59.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z34 (ohne DTI) – Zugversuch .....C-71
Tabelle C.60.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z35 (ohne DTI) – Zugversuch .....C-73
Tabelle C.61.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z36 (ohne DTI) – Zugversuch .....C-75
Tabelle C.62.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z37 (ohne DTI) – Zugversuch .....C-77
Tabelle C.63.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z38 (ohne DTI) – Zugversuch .....C-79
Tabelle C.64.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z39 (ohne DTI) – Zugversuch .....C-81

Tabelle C.65.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z40 (mit DTI) – Anziehen .....	C-83
Tabelle C.66.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z40 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-83
Tabelle C.67.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z41 (mit DTI) – Anziehen .....	C-85
Tabelle C.68.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z41 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-85
Tabelle C.69.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z42 (mit DTI) – Anziehen .....	C-87
Tabelle C.70.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z42 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-87
Tabelle C.71.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z43 (mit DTI) – Anziehen .....	C-89
Tabelle C.72.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z43 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-89
Tabelle C.73.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z44 (mit DTI) – Anziehen .....	C-91
Tabelle C.74.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z44 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-91
Tabelle C.75.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z45 (mit DTI) – Anziehen .....	C-93
Tabelle C.76.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z45 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-93
Tabelle C.77.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z46 (mit DTI) – Anziehen .....	C-95
Tabelle C.78.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z46 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-95
Tabelle C.79.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z47 (mit DTI) – Anziehen .....	C-97
Tabelle C.80.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z47 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-97
Tabelle C.81.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z48 (mit DTI) – Anziehen .....	C-99
Tabelle C.82.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z48 (mit DTI) – Zugversuch ....	C-99
Tabelle C.83.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z49 (mit DTI) – Anziehen .....	C-101
Tabelle C.84.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z49 (mit DTI) – Zugversuch ..	C-101
Tabelle C.85.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z50 (mit DTI) – Anziehen .....	C-103
Tabelle C.86.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z50 (mit DTI) – Zugversuch ..	C-103
Tabelle C.87.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z51 (mit DTI) – Anziehen .....	C-105
Tabelle C.88.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z51 (mit DTI) – Zugversuch ..	C-105
Tabelle C.89.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z52 (mit DTI) – Anziehen .....	C-107
Tabelle C.90.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z52 (mit DTI) – Zugversuch ..	C-107
Tabelle C.91.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z53 (mit DTI) – Anziehen .....	C-109
Tabelle C.92.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z53 (mit DTI) – Zugversuch ..	C-109
Tabelle C.93.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z54 (ohne DTI) – Zugversuch .....	C-111

Tabelle C.94.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z55 (ohne DTI) – Zugversuch .....	C-113
Tabelle C.95.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z56 (ohne DTI) – Zugversuch .....	C-115
Tabelle C.96.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z57 (ohne DTI) – Zugversuch .....	C-117
Tabelle C.97.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z58 (ohne DTI) – Zugversuch .....	C-119
Tabelle C.98.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z59 (ohne DTI) – Zugversuch .....	C-121
Tabelle C.99.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z60 (ohne DTI) – Zugversuch .....	C-123
Tabelle C.100.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z61 (ohne DTI) – Zugversuch .....	C-125
Tabelle C.101.	Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z62 (ohne DTI) – Zugversuch .....	C-127
Tabelle C.102.	Vorspannkraftverluste nach Lastwechseln unter Axialkraft – Prüfkörper M16 mit DTI.....	C-133
Tabelle C.103.	Vorspannkraftverluste nach Lastwechseln unter Axialkraft – Prüfkörper M20 mit DTI.....	C-134
Tabelle C.104.	Vorspannkraftverluste nach Lastwechseln unter Axialkraft – Prüfkörper M16 und M20 ohne DTI .....	C-135
Tabelle C.105.	Montagevorspannkkräfte bei Erreichen des Fühllehren-Kriteriums, Serie M16 – H8, Zusammenfassung von Anziehversuchen und Bauteil-Zugversuchen .....	C-136
Tabelle C.106.	Montagevorspannkkräfte bei Erreichen des Fühllehren-Kriteriums, Serien M16 – H10, Zusammenfassung von Anziehversuchen und Bauteil-Zugversuchen .....	C-137
Tabelle C.107.	Montagevorspannkkräfte bei Erreichen des Fühllehren-Kriteriums, Serien M20, Zusammenfassung von Anziehversuchen und Bauteil- Zugversuchen .....	C-138
Tabelle D.1.	Elastische Nachgiebigkeit der Schraubengarnituren .....	D-1
Tabelle D.2.	Elastische Nachgiebigkeit der Bauteile .....	D-3
Tabelle D.3.	Ermittlung der Modellkennwerte – elastisch-plastisches Verhalten .....	D-5
Tabelle D.4.	Ermittlung der Modellkennwerte – elastisches Verhalten .....	D-6
Tabelle D.5.	Krafteinleitungsfaktoren für Bauteil-Zugversuche nach VDI 2230-1 .....	D-7

---

Tabelle D.6.	Vereinfachte Abschätzung der Krafteinleitungsfaktoren für Bauteil- Zugversuche.....	D-9
Tabelle D.7.	Grenzen der Fallunterscheidung für axiale Schraubenzusatzkräfte und zugehörige Verformungen entsprechend Tabelle 5.10.....	D-14

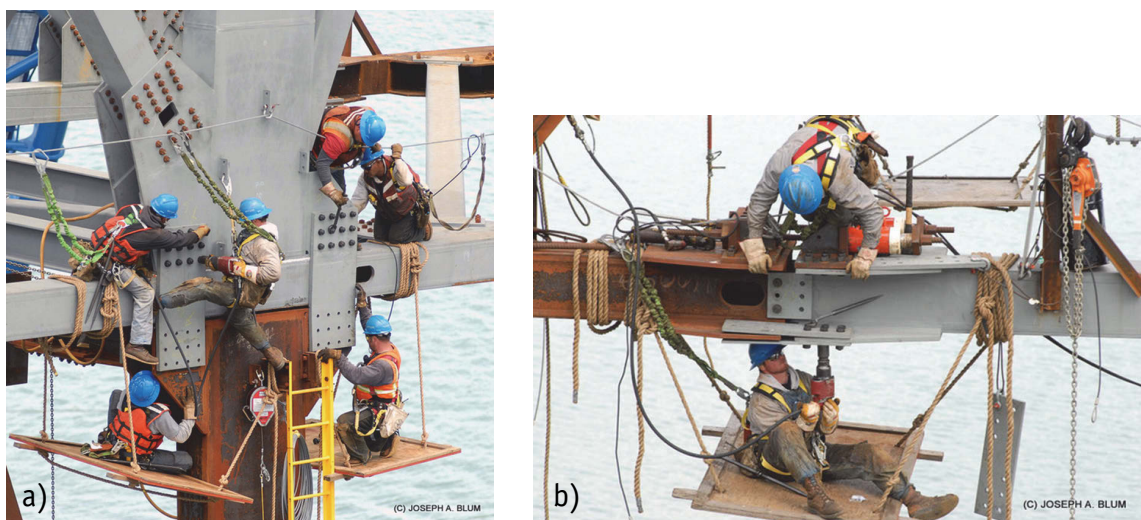


# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Vorgespannte Verbindungen sind dauerhafte Schraub- oder Nietverbindungen, bei denen die eingebrachte Vorspannung so hoch ist, dass die Betriebsbeanspruchungen zuverlässig übertragen werden und ein selbsttätiges Lösen ausgeschlossen ist. Sie finden zum Beispiel Anwendung im allgemeinen Maschinenbau, Fahrzeugbau und Anlagenbau.

Im Bauwesen, speziell im Stahlbau, ist die vorgespannte geschraubte Verbindung als direkte Nachfolge der Nietverbindung seit Anfang der 50er-Jahre weltweit etabliert [RCSC51], [DAST56], [WL60]. Allerdings ist die Ausführung in vielen Ländern bezüglich der Geometrie der Komponenten der Schraubengarnitur und der Vorspannmethoden unterschiedlich, wie insbesondere die Zusammenführung der nationalen Regeln für geschraubte Verbindungen zu den Eurocodes EN 1993 (Bemessung und Konstruktion) sowie zu EN 1090-2 (Ausführung) und EN 14399 (Produkte) verdeutlicht. Das kontrollierte Einbringen der Vorspannkraft stellt für diese Verbindungsart die größte Herausforderung dar, da die Montagebedingungen vielfältig und zum Teil schwierig sind, siehe Bild 1.1.



**Bild 1.1.** Ausführung geschraubter Verbindungen unter Baustellenbedingungen, Fotos © Joseph A. Blum

**Figure 1.1.** Execution of bolted joints under site conditions, photos © Joseph A. Blum

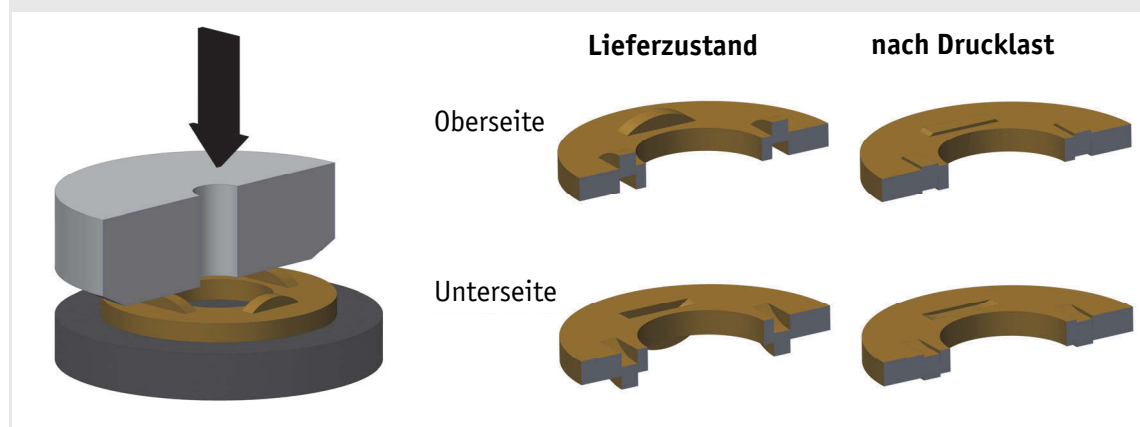
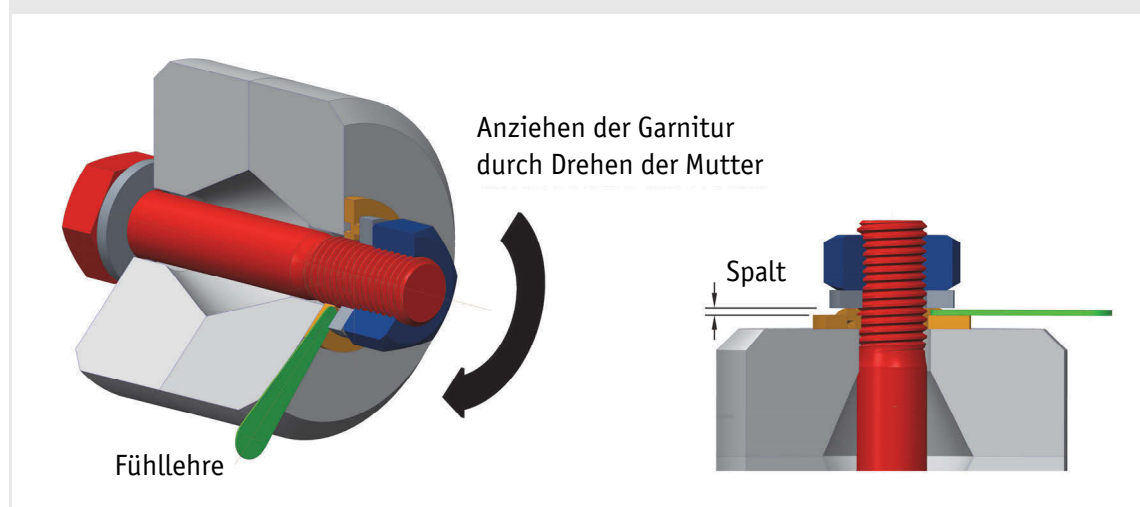
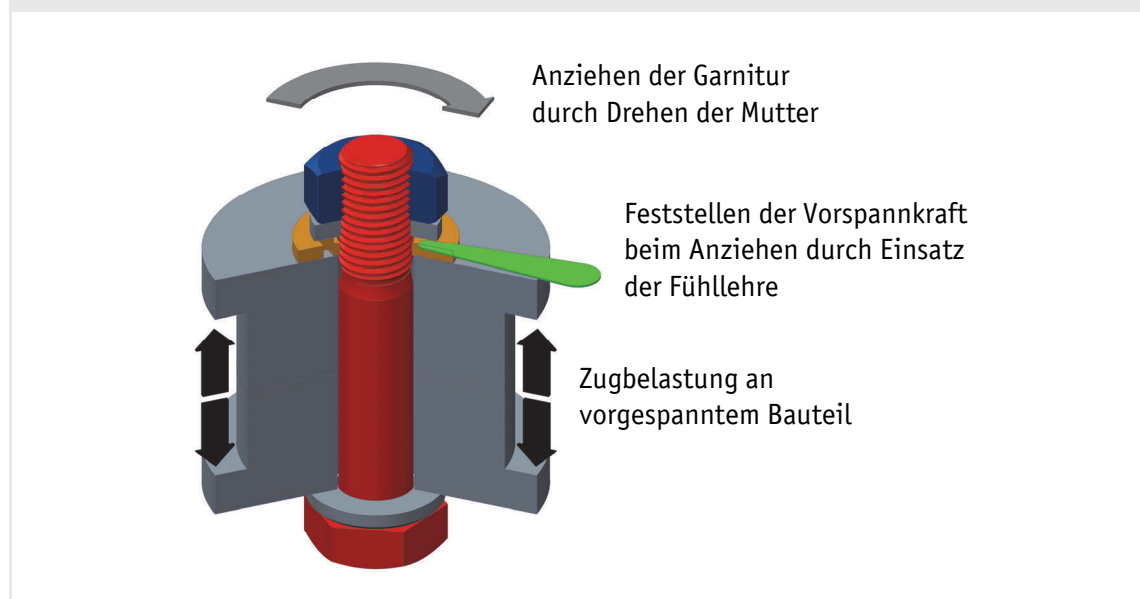
Mit Einführung der EN 1090-2 werden unterschiedliche Vorspannverfahren angeboten, unter anderem das *Drehmomentverfahren*, das *kombinierte Verfahren*, das Verfahren mit *HRC-Garnituren* und das Verfahren mit *direkten Kraftanzeigern* (engl. *Direct Tension Indicator*, DTI), für die detaillierte Anwendungsregeln bereitgestellt sind. Darüber hinaus sind andere Anziehverfahren zulässig, z. B. die im Maschinenbau verbreiteten *ziehenden Verfahren*, die nach Maßgabe der Ausrüstungshersteller auszuführen sind. Obwohl das Drehmomentverfahren und das kombinierte Verfahren (Drehmoment-/Drehwinkelverfahren) im Bauwesen prinzipiell bekannt sind, wird in Deutschland im Stahlbau fast ausschließlich das Drehmomentverfahren angewendet. Die in Deutschland im Stahlbau tätigen Ingenieure und ausführenden Unternehmen sind mit den übrigen Verfahren – einschließlich dem kombinierten Verfahren – nicht vertraut. Es wurde daher das Verfahren mit direkten Kraftanzeigern – als eines der unbekannten Verfahren – ausgewählt, um im Rahmen der vorliegenden Arbeit das Tragverhalten der vorgespannten geschraubten Verbindung bei Einsatz von direkten Kraftanzeigern insbesondere unter Zugbeanspruchung zu untersuchen.

Direkte Kraftanzeiger bieten eine leicht verständliche Möglichkeit, das Maß der eingebrachten Vorspannkraft bei der Installation direkt zu überprüfen. Beim Anziehen der Schraubenverbindung werden die Überstände des scheibenförmigen DTI, siehe Bild 1.2, plastisch zusammengedrückt. Mit Hilfe einer Fühllehre wird kontrolliert, ob die Überstände in ausreichendem Maße zusammengedrückt wurden. Dann soll sichergestellt sein, dass das erforderliche Vorspannkraftniveau erreicht wurde.

Die Erfindung des DTI [Tu62] stammt aus der Zeit, in der die Entwicklung der Schraubtechnik insbesondere durch das gezielte Vorspannen hochfester Schrauben zur Herstellung scherbeanspruchter gleitfester Verbindungen vorangetrieben wurde. Der DTI hat sich daher in dieser Anwendungsform besonders etabliert. Das Verfahren mit DTI unterliegt in den heutigen Regelwerken keinen besonderen Einschränkungen und ist daher neben allen anderen Verfahren ebenso für reine und kombiniert zugbeanspruchte Verbindungen einsetzbar.

Während im angelsächsischen Raum der Einsatz von DTI verbreitet ist, vgl. [RCSC14], [Bi08], [WR03], [Sh98], [OC89], [BP78], ist die Anwendung des DTI – wie bereits erwähnt – in Deutschland weitestgehend unbekannt – obwohl sie dem Fachpublikum frühzeitig vorgestellt wurde [Sc76] – und sogar durch den Nationalen Anhang DIN EN 1993-1-8/NA zur DIN EN 1993-1-8 – aufgrund von mangelnder Anwendungserfahrung [SHM15] – derzeit ausgeschlossen.



**Schritt 1: Drucklastversuche an direkten Kraftanzeigern****Schritt 2: Anziehversuche an HV-Garnituren mit DTI****Schritt 3: Zugversuche an Bauteilen mit vorgespannten HV-Garnituren mit DTI****Bild 1.2.** Schritte der experimentellen Untersuchungen**Figure 1.2.** Steps of experimental investigations

## 1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es zum einen, ein allgemeines Verständnis über das Last-Verformung-Verhalten des direkten Kraftanzeigers – als einzelne Komponente und innerhalb der Schraubengarnitur – sowie über das Tragverhalten der vorgespannten Verbindung zu gewinnen, indem die Anwendung von direkten Kraftanzeigern in der Montage sowie ihre Beobachtung in der vorgespannten Verbindung durchgeführt wird. Zum anderen wird überprüft, ob beim Vorspannen mit DTI der Erhalt der Vorspannkraft unter äußerer Zugbeanspruchung in Richtung der Schraubenachse gewährleistet ist.

## 1.3 Vorgehensweise

Im Anschluss an die Einleitung in Kapitel 1 erfolgen in den Kapiteln 2 und 3 zunächst prinzipielle Erläuterungen zum Vorspannen von geschraubten Verbindungen im Allgemeinen und zum Stand der Technik bei direkten Kraftanzeigern im Besonderen.

Danach erfolgt in Kapitel 4 die Beschreibung der durchgeführten experimentellen Untersuchungen, die aus Drucklastversuchen, Anziehversuchen an Garnituren und Zugversuchen an vorgespannten Verbindungen – alle unter Beteiligung von direkten Kraftanzeigern – bestehen. Hierzu wird im ersten Schritt im Rahmen von Drucklastversuchen untersucht, ob eine Auswahl marktgängiger direkter Kraftanzeiger die normativen Anforderungen an die Gebrauchseignung zur Anzeige der Mindestvorspannkraft durch das definierte Spaltmaß auch tatsächlich erfüllt.

Umfangreiche Anziehversuche zeigen im zweiten Schritt, ob die Mindestvorspannkraft auch innerhalb der Schraubengarnitur durch das Anziehen zuverlässig erreicht wird. Dies wird mit Hilfe von Fühllehren überprüft, indem die verbleibende Höhe des Spaltes zwischen den Überständen entsprechend der Anwendungsregeln für direkte Kraftanzeiger bewertet wird.

Im dritten Schritt werden zwei, durch eine vorgespannte Schraubengarnitur mit DTI zusammengefügte Bauteile unter axialer Betriebsbeanspruchung im Zugversuch geprüft. So kann festgestellt werden, ob das aufgeprägte Vorspannkraftniveau dauerhaft erhalten bleibt. Diese schrittweise experimentelle Vorgehensweise ist in Bild 1.2 zusammenfassend dargestellt.

Mit Hilfe dieser experimentellen Untersuchungen wird in Kapitel 5 ein mechanisches Modell zur Erweiterung des allgemeinen Verspannungsschaubildes

entwickelt, validiert und angewendet, welches auch für anderweitige Bauteilgeometrien eingesetzt werden kann, um mögliche Vorspannkraftverluste unter Beteiligung von direkten Kraftanzeigern abzuschätzen.

Aus den gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnissen werden Empfehlungen für die Weiterentwicklung der einschlägigen Normen EN 14399-9 und EN 1090-2 abgeleitet, die in Kapitel 6 zusammengestellt sind.

In Kapitel 7 erfolgt eine Zusammenfassung und es wird ein Ausblick auf weitere Fragestellungen gegeben, denen in zukünftigen Forschungsvorhaben nachgegangen werden sollte.



## **2 Vorspannen von geschraubten Verbindungen**

### **2.1 Allgemeines**

Im Bauwesen legt der Tragwerksplaner die konstruktive Durchbildung eines geschraubten Anschlusses fest. Dies geschieht durch die Auswahl und Festlegung der Kategorie der Verbindung bzw. Ausführungsform, der Abmessungen und Festigkeitsklasse sowie der entsprechend einsetzbaren Produkte. Die Höhe der Mindestvorspannkraft für vorgespannte Verbindungen, die bei der Ausführung in der Regel zu erzielen ist, ist in EN 1993-1-8 festgelegt. Wie diese Vorspannkraft erzeugt werden kann, ist in EN 1090-2 geregelt. Im Allgemeinen obliegt dem ausführenden Unternehmen die Auswahl des Anziehverfahrens. Bevor die unterschiedlichen Verfahren nachfolgend vorgestellt werden, wird zunächst die Wirkungsweise der Vorspannung und deren Berechnungsgrundlagen beschrieben.

Die im Folgenden verwendeten Formelzeichen orientieren sich an den Benennungen entsprechend der VDI-Richtlinie 2230 Blatt 1. Alternative Notationen, wie sie im Stahlbau vielfach geläufig und gebräuchlich sind, entsprechen zum Beispiel denen, die PETERSEN [Pe13] verwendet.

### **2.2 Wirkungsweise der Vorspannung**

Die Vorspannung einer Schraube presst mehrere Bauteile aneinander. Die Einzelteile sind somit durch den erzeugten Kraft- bzw. Reibschluss zu einem Bauteil verbunden. Die Einzelteile lassen sich durch Lösen der geschraubten Verbindung wieder trennen, und zwar zerstörungsfrei. Die Berechenbarkeit der vorgespannten geschraubten Verbindung ist für den zuverlässigen, dauerhaften und wirtschaftlichen Einsatz unabdingbar.

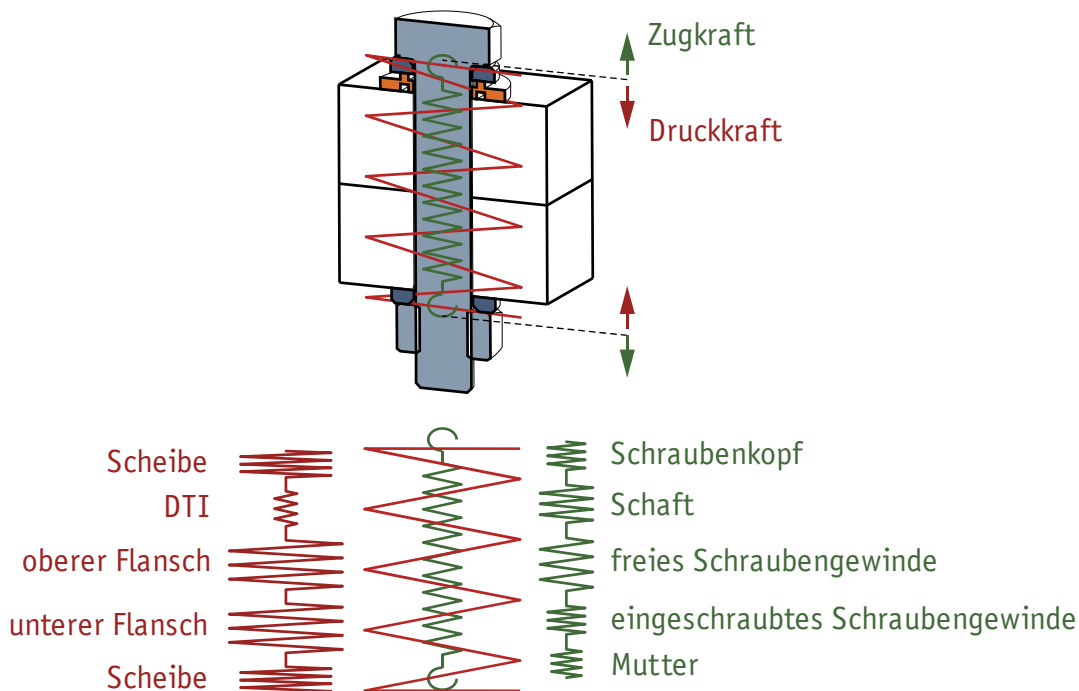
Die Wirkung der Vorspannung lässt sich durch ein elastisches Federmodell beschreiben, in welchem die verspannten Bauteile als druckbeanspruchte, die vorgespannte Schraube als zugbeanspruchte Feder betrachtet werden, siehe [KTW07] und VDI 2230-1. Dabei werden sämtliche druckbeanspruchte Komponenten – zum Beispiel Ringflansche oder Stirnplatten sowie eine oder mehrere Unterlegscheiben – mit ihren einzelnen Steifigkeiten  $C$  bzw. Nachgiebigkeiten  $\delta$  zu einer idealisierten Druckfeder zusammengefasst. Entsprechend wird mit den

einzelnen Konstruktionsteilen der Schraube, d.h. dem Kopf, Schaft und Gewinde verfahren. Die Mutter, oder ein Innengewinde, wird entsprechend ihrer Wirkung der Schraube, d.h. der Zugfeder zugeordnet. In Bild 2.1 ist dies schematisch dargestellt.

Durch Zusammenfassen der jeweiligen Einzelsteifigkeiten wird rechnerisch die Gesamtsteifigkeit der Druck- und der Zugfeder ermittelt. Die aneinander in Reihe geschalteten Federn verdeutlichen dies.

Beim Anziehen der Schraubengarnitur wird eine Vorspannkraft  $F_V$  erzeugt. Trägt man für Schraubengarnitur und Bauteile die idealisierte elastische Beziehung zwischen Kraft  $F_V$  und Verlängerung der Schraube  $f_s$  bzw. Verkürzung der Bauteile  $f_p$  in einem Diagramm auf, so erhält man eine prinzipielle Darstellung entsprechend Bild 2.2. Die Gradienten der Verformungskennlinien sind durch die elastischen Steifigkeiten der Schraube  $C_s$  und der Bauteile  $C_p$  gegeben. Eine Beanspruchung der Schraube und der Bauteile bis in den Bereich plastischer Verformungen ist in Bild 2.2 schematisch angedeutet.

Werden beide Verformungskennlinien in einem gemeinsamen Diagramm zusammengefügt, erhält man daraus das allgemein bekannte Verspannungsschaubild der vorgespannten Schraubenverbindung für den Montagezustand, siehe Bild

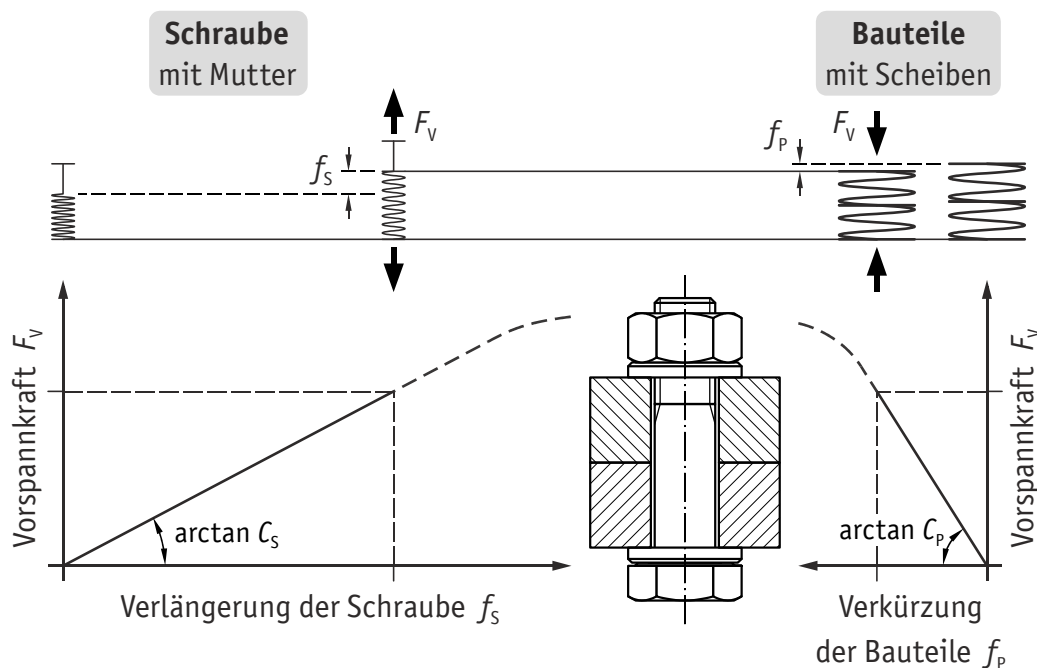


**Bild 2.1.** Federmodell der vorgespannten Schraubenverbindung bei der Montage

**Figure 2.1.** Spring model of a preloaded bolted joint within installation

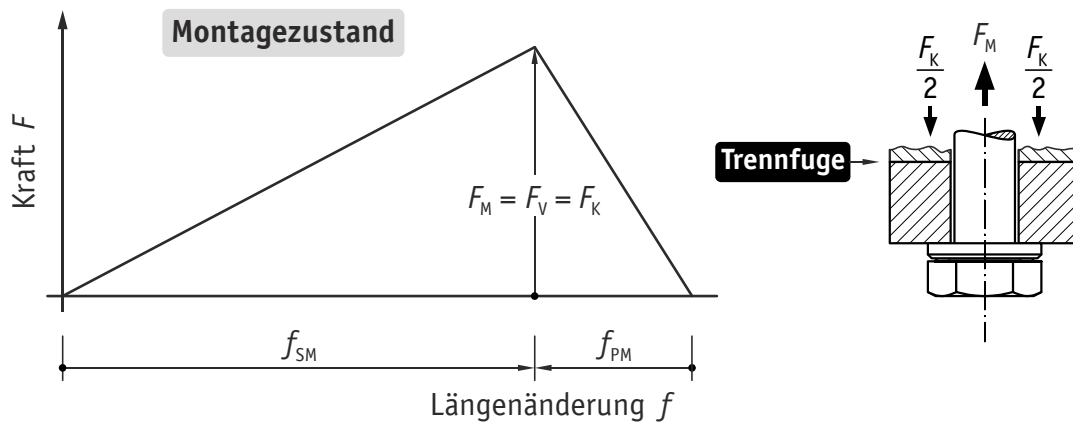
2.3. Die Kennwerte im Montagezustand werden mit dem Index M benannt. Die Montagevorspannkraft  $F_M$  entspricht nun der Vorspannkraft  $F_V$ . Diese ist im Kräftegleichgewicht des Montagezustandes identisch mit der Klemmkraft  $F_K$  in den Bauteilen und – bei korrekter Ausführung der Verbindung – in den Trennfugen der Bauteile.

Wird die Verbindung durch eine Betriebskraft  $F_A$  zentrisch auf Zug beansprucht, so ist das Verspannungsschaubild gemäß Bild 2.4 zu ergänzen. Hier erfolgt die Kennzeichnung eines zentrisch axialen Angriffs einer Betriebskraft mit dem Index A. Die Schraube und die Bauteile werden durch die auf Zug wirkende Betriebskraft  $F_A$  jeweils um den Betrag  $f_{SA}$  bzw.  $f_{PA}$  in gleichem Maße verlängert. Für die Bauteile ist dies das elastische Rückfedern der zuvor aufgebrachten Verkürzung. Die dazu zu berücksichtigenden Verformungskennlinien für die Schraube und die Bauteile weichen in der Regel von den Kennlinien des Montagezustandes aufgrund des Krafteinleitungsortes und der Steifigkeitsunterschiede zwischen dem Montage- und dem Betriebszustand ab, vgl. Kapitel 5.2.1. Bild 2.4 zeigt die Verformungskennlinien im Montagezustand schematisch als Punktlinien.



**Bild 2.2.** Verlängerung-Kraft-Diagramme für Schraube und Bauteile mit Vorspannung im elastischen Bereich (schematisch)

**Figure 2.2.** Elongation-load-diagram of bolt and components with preload in the elastic region (schematic)

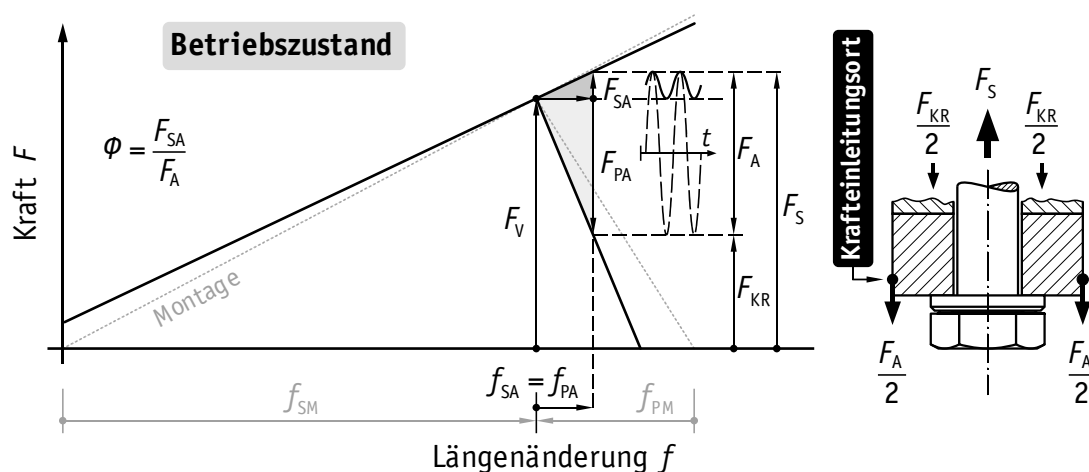


**Bild 2.3.** Verspannungsschaubild für den Montagezustand einer zentrisch verspannten Schraubenverbindung (schematisch)

**Figure 2.3.** Joint diagram in the assembly state of a concentrically clamped bolted joint (schematic)

Es ergibt sich ein neuer Gleichgewichtszustand, in dem die Vorspannkraft der Schraube  $F_V$  um die Zusatzkraft  $F_{SA}$  vergrößert wird, die Vorspannkraft im Bauteil um den Betrag  $F_{PA}$  reduziert wird. Die verbleibende Restklemmkraft  $F_{KR}$  in den Trennfugen der Bauteile ist zusammen mit der Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$  die entscheidende Bezugsgröße für die Dauerhaltbarkeit der Schraubenverbindung.

In der Regel liegt eine zyklische, d. h. wechselnde oder nicht vorwiegend ruhende Beanspruchung der Schraubenverbindung durch  $F_A$  vor, die durch den exemplari-



**Bild 2.4.** Verspannungsschaubild für den Betriebszustand einer zentrisch verspannten und zentrisch belasteten Schraubenverbindung (schematisch)

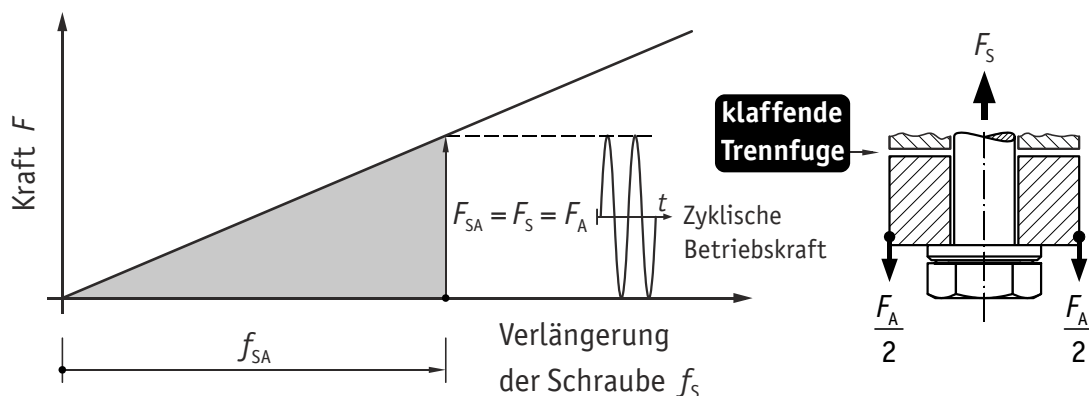
**Figure 2.4.** Joint diagram in the working state of a concentrically clamped and concentrically loaded bolted joint (schematic)



schen Amplitudenverlauf in Bild 2.4 angedeutet ist. Die Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$  ist demzufolge die wirksame Ermüdungsbeanspruchung, für die der Nachweis der Dauerhaltbarkeit bzw. Ermüdungsfestigkeit der Schraubenverbindung geführt werden muss. Der Vorteil der vorgespannten Verbindung ist somit ersichtlich. Der Nachweis gegen Ermüdung muss nur mit der Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$  und nicht mit der wesentlich größeren Betriebskraft  $F_A$  geführt werden.

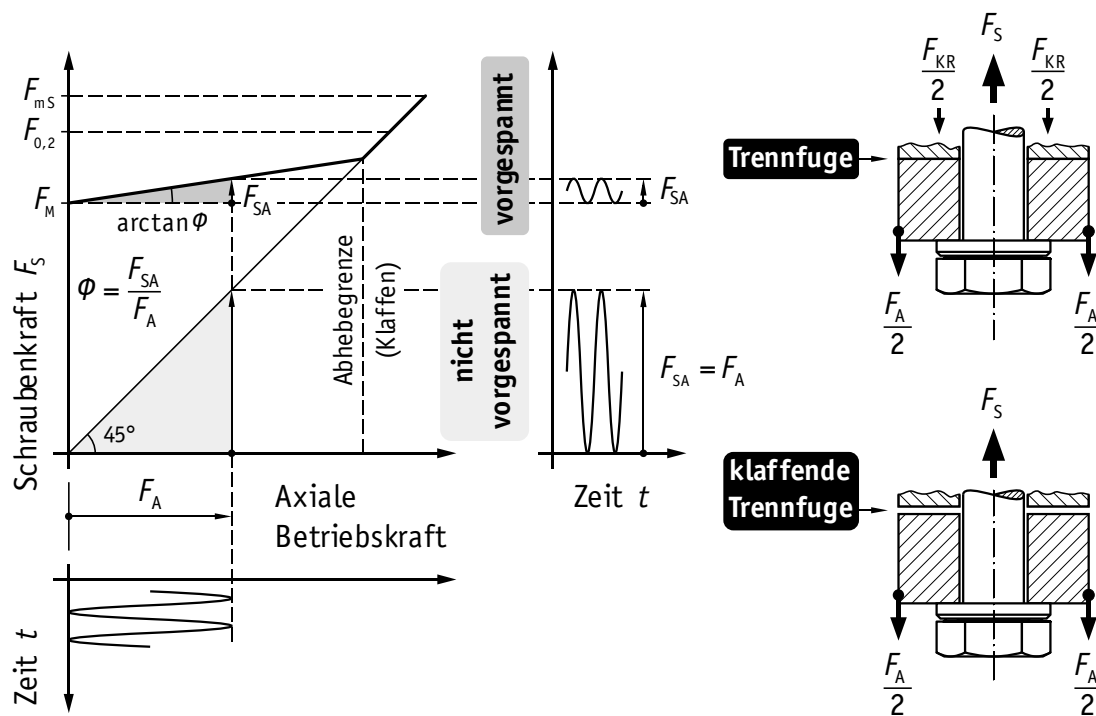
Im Gegensatz hierzu ist in einer nichtvorgespannten Schraubenverbindung die vollständige zyklische Betriebskraft  $F_A$  in der Schraube gegen Ermüdung nachzuweisen, siehe Bild 2.5. Außerdem besteht ohne eine Vorspannung die große Gefahr, dass die Verbindung bei wechselnden Beanspruchungen und den resultierenden Verformungen auseinander fällt, indem Schraube und Mutter losgedreht werden. Eine ausreichend große Vorspannkraft, und selbstverständlich deren dauerhafter Erhalt, ist eine wirksame Sicherung gegen selbsttätiges Lösen der Schraubenverbindung.

Die vorgespannte Verbindung kann den Vorteil der geringen Schraubenzusatzkraft nur bei geschlossener bzw. überdrückter Trennfuge zwischen den Bauteilen bieten. Bei übermäßig hoher Betriebskraft oder zu geringer Vorspannkraft kann es zum Klaffen der Trennfuge kommen, mit dem die Schraubenzusatzkraft überproportional anwächst, siehe Bild 2.6. Nach Überschreiten der Abhebegrenze sind die Betriebskraft-Schraubenkraft-Kurven für die vorgespannte und nichtvorgespannte Verbindung identisch.



**Bild 2.5.** Schaubild für den Betriebszustand einer nichtvorgespannten und zentrisch belasteten Schraubenverbindung (schematisch)

**Figure 2.5.** Diagram in the working state of a non-preloaded and concentrically loaded bolted joint (schematic)

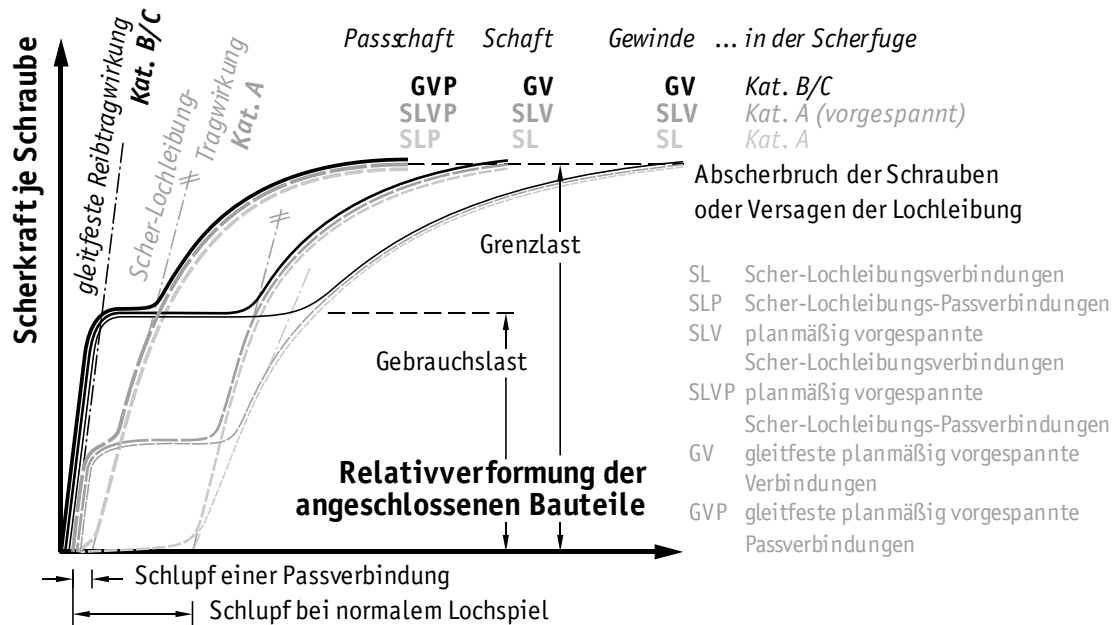


**Bild 2.6.** Betriebskraft-Schraubenkraft-Diagramm von zentrisch belasteten, vorgespannten und nichtvorgespannten Schraubenverbindungen (schematisch)

**Figure 2.6.** Working load-bolt load-diagram of concentrically loaded, preloaded and non-preloaded bolted joints (schematic)

Für die Einbeziehung eines direkten Kraftanzeigers in die vorgespannte Verbindung muss das idealisierte, auf elastischem Materialverhalten von Schraubengarnitur und Bauteilen basierende Verspannungsschaubild erweitert werden. Dies erfolgt im Rahmen dieser Arbeit unter Berücksichtigung des elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens des DTI ausführlich in Kapitel 5. Außerdem wird dort auf den Krafteinleitungsort und die Steifigkeitsunterschiede zwischen Montage- und Betriebszustand eingegangen, die in Bild 2.4 angedeutet sind.

Die im Verspannungsschaubild berücksichtigten Verformungen beziehen sich ausschließlich auf die axiale Längenänderung der Schraube sowie die korrespondierende Verformung der verspannten Bauteile. Für scherbeanspruchte Verbindungen ist das Last-Verformung-Verhalten schematisch in Bild 2.7 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass eine Vorspannung der Schrauben zusammen mit reibwert erhöhenden Maßnahmen in den Trennfugen der Bauteile die relative Verformung der (gleitfesten) Verbindung erheblich reduziert. Die Bezeichnungen der Verbindungsarten entsprechen überwiegend denjenigen gemäß DIN 18800, siehe auch [HV02] und [SZB05]. Die Unterscheidung in die Kategorien A sowie B und C ist



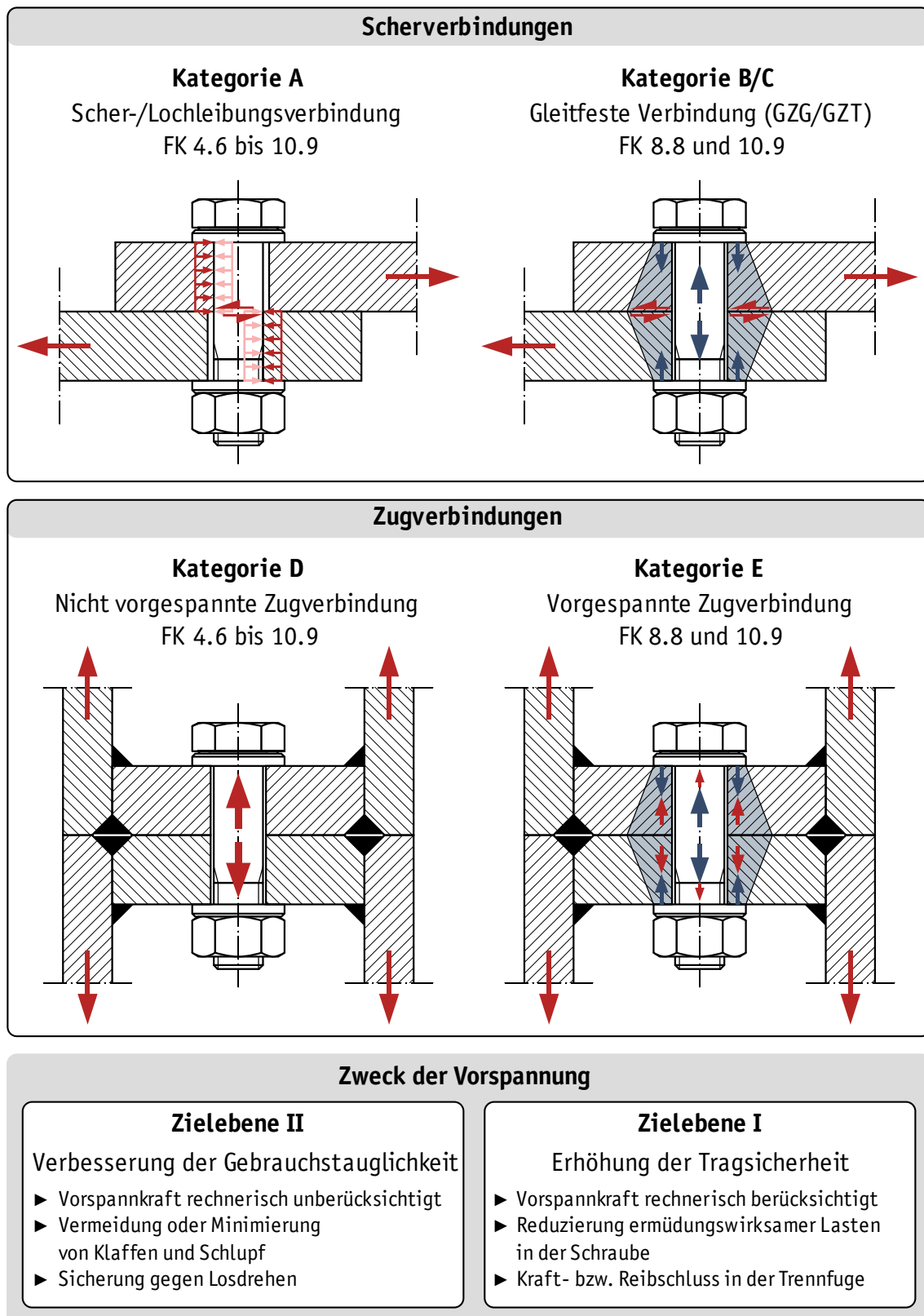
**Bild 2.7.** Last-Verformung-Verhalten von Scherverbindungen (schematisch)  
in Anlehnung an SCHMIDT [Sc91]

**Figure 2.7.** Load-deformation-behaviour of bolted shear connections (schematic)  
based on SCHMIDT [Sc91]

entsprechend EN 1993-1-8 vorgenommen und wird nachfolgend näher beschrieben. Auf weitere Erläuterungen zu scherbeanspruchten Verbindungen wird im Kontext dieser Arbeit verzichtet.

## 2.3 Größe und Anwendungszweck der Vorspannung

EN 1993-1-8 definiert fünf Kategorien – A bis E – geschraubter Verbindungen, die sich in Scher- (Kat. A und B/C) sowie Zugverbindungen (Kat. D und E) unterteilen, siehe Bild 2.8. Vorgespannte Verbindungen zum Zweck der Erhöhung der Tragsicherheit (Zielebene I des Vorspannens) sind hierbei die gleitfesten Verbindungen der Kategorien B und C sowie die zugbeanspruchten Verbindungen der Kategorie E. Nichtsdestotrotz werden in der Praxis sehr häufig Scher-/Lochleibungsverbindungen der Kategorie A sowie Zugverbindungen der Kategorie D, die unter Vernachlässigung der Vorspannung bemessen sind, zur Vermeidung von Schlupf und Verformungen in der Verbindung und somit aus Gründen der Gebrauchstauglichkeit vorgespannt (Zielebene II des Vorspannens).



**Bild 2.8.** Kategorien von Schraubenverbindungen nach EN 1993-1-8 und Zweck der Vorspannung nach SCHMIDT [SS11], [IML]

**Figure 2.8.** Categories of bolted joints according to EN 1993-1-8 and purpose of preload according to SCHMIDT [SS11], [IML]

Die Unterscheidung der ausgeführten Vorspannung in die beiden *Zielebenen I* und *II* wurde von SCHMIDT [SS11] eingeführt. Sie unterstreicht die Bedeutung der jeweiligen Vorspannung und lässt die mit dem Vorspannen verbundenen Anforderungen und Maßnahmen in geeigneter Weise beurteilen und handhaben. Sie ist bisher in den Regelwerken des Bauwesens in dieser oder ähnlicher Form nicht verankert.

Eine konsequente Berücksichtigung des Zwecks und der Sicherheitsanforderungen an die Ausführung vorgespannter geschraubter Verbindungen, also der Zielebene der Vorspannung, ist demgegenüber in den Regelwerken des Automobilbaus (VDI/VDE 2862-1), des Anlagen-, Maschinen- und Apparatebaus (VDI/VDE 2862-2) sowie des Schienenfahrzeugbaus (DIN 25201) zu finden.

EN 1993-1-8 und EN 1090-2 definieren – „*sofern nichts anderes festgelegt wird*“ bzw. „*in der Regel*“ – die Mindestvorspannkraft  $F_{p,C}$  wie folgt:

$$F_{p,C} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s \quad (2.1)$$

Falls keine gesonderten Regeln vorliegen, ist der Bemessungswert der Vorspannkraft für die Berechnung folgendermaßen anzusetzen:

$$F_{p,Cd} = \frac{0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M7}} \quad \text{mit } \gamma_{M7} = 1,1 \quad (2.2)$$

Alle Regelungen der EN 1090-2 zum Vorspannen beziehen sich auf dieses Vorspannkraftniveau  $F_{p,C}$ . Soll ein niedrigeres Vorspannkraftniveau als  $F_{p,C}$  angewendet werden, ist dies explizit nach EN 1090-2 zulässig, sofern für das gewählte Anziehverfahren die Anziehparameter, z.B. Anziehmomente, Drehwinkel etc., zusammen mit den zu verwendenden Verbindungselementen und den Kontrollanforderungen daraufhin ausgelegt werden.

Nach DIN EN 1993-1-8/NA ist die in Deutschland bisher gebräuchliche Regelvorspannkraft  $F_V = F_{p,C}^*$  wie folgt definiert:

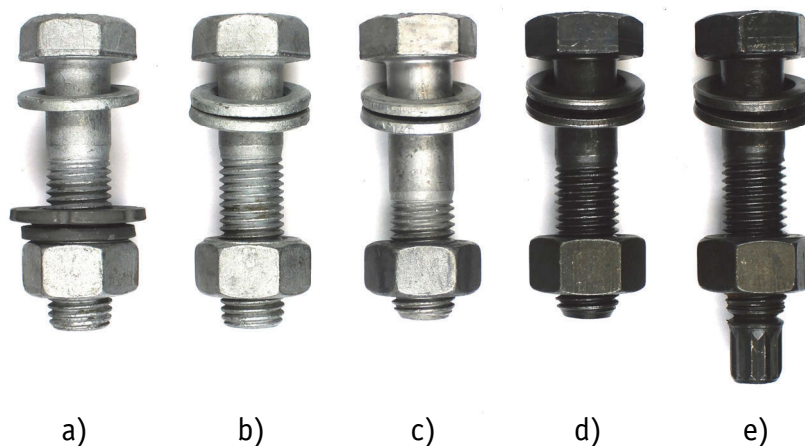
$$F_{p,C}^* = 0,7 \cdot f_{yb} \cdot A_s \quad (2.3)$$

Die verwendbaren Verbindungselemente sowie die zugehörigen Anziehparameter unterschiedlicher Anziehverfahren sind dort ebenfalls geregelt, wobei im Wesentlichen das modifizierte Drehmomentverfahren von Bedeutung ist, welches dem „traditionellen“ Drehmomentverfahren nach DIN 18800-7 entspricht. Die Anziehverfahren gemäß EN 1090-2 werden nachfolgend ausführlich erläutert.

## 2.4 Verbindungselemente – Garnituren

Das traditionelle und bewährte Verbindungselement zur Herstellung geschraubter Verbindungen im Stahlbau ist die Garnitur aus Sechskantschraube und Sechskantmutter. Für die Ausführung von Verbindungen ohne Vorspannung, d.h. höchstens mit handfestem Anzug, sind Sechskantschrauben und -mutter mit normaler Schlüsselweite entsprechend ISO 272 geeignet. Sie sind gegebenenfalls mit erforderlichen und geeigneten Scheiben zu ergänzen. Die Anforderungen an nicht vorgespannte Verbindungselemente sind in EN 15048-1 geregelt. Andere Formen von Schrauben, z.B. Innensechskantschrauben mit Zylinder- oder Senkkopf, sind unter Einhaltung der Anforderungen ebenso einsetzbar.

Hochfeste vorgespannte Verbindungen in den Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9 bestehen überwiegend aus Garnituren mit großer Schlüsselweite und zusätzlichen Scheiben, siehe exemplarisch Bild 2.9. Ausnahmen bestehen für die Festigkeitsklasse 8.8 im Hinblick auf die Schlüsselweite, vgl. DIN EN 1993-1-8/NA, und die Ausführung mit nur einer Scheibe, vgl. EN 1090-2. Die grundsätzlichen Anforderungen an die Garnituren sind in der Schirm-Produktnorm EN 14399-1 geregelt. Produkte, die diese Anforderungen erfüllen, sind in den weiteren Teilen 3 bis 10 beschrieben. Weitere Erläuterungen sind der einschlägigen Literatur zu entnehmen, zum Beispiel [SS11] und [SZB12].



**Bild 2.9.** Vorspannbare Schraubengarnituren  $M20 \times 80$  – 10.9/10 nach EN 14399: HR-Garnitur mit DTI (a), HR-Garnitur (b) und (d), HV-Garnitur (c), HRC-Garnitur (e)

**Figure 2.9.** Preloadable structural bolting assemblies  $M20 \times 80$  – 10.9/10 according to EN 14399: system HR including DTI (a), system HR (b) and (d), system HV (c), system HRC (e)

## 2.5 Methoden zum Vorspannen

### 2.5.1 Allgemeines

Ein Vorspannverfahren muss in der Lage sein, eine definierte Vorspannkraft reproduzierbar in die Schraubenverbindung einzubringen. In einer regulär ausgeführten Verbindung ist die Vorspannkraft identisch mit der Schraubenkraft (Zugkraft) und der Klemmkraft in den Trennfugen (Druckkraft), für die entsprechend Bild 2.3 Kräftegleichgewicht herrscht. Die Überwachung und Steuerung der Vorspannkraft erfolgt aus praktischen Gründen in der Regel über die Schraubenkraft.

Grundsätzlich sind für das Vorspannen zwei Arten von Verfahren verfügbar, drehende Verfahren und ziehende Verfahren. Für den universellen Einsatz sind die drehenden Verfahren mit den in dieser Gruppe verfügbaren unterschiedlichen Varianten in sämtlichen Anwendungs- und in allen Abmessungsbereichen verbreitet, vgl. [DSV07], [KTW07], [IE01]. Aufgrund der baupraktischen Bedeutung und der Fokussierung dieser Arbeit werden nur die in EN 1090-2 enthaltenen Anziehverfahren, ausnahmslos drehende Verfahren, nachfolgend erläutert.

Das ziehende, dadurch reibungs- und torsionsfreie Anziehen mit Hilfe von hydraulischen Spannzylindern ist aufgrund der benötigten Abmessungen für Schraube und Anziehwerkzeug für Durchmesser ab etwa M20 einsetzbar. Zudem sollten, ohne besondere Maßnahmen vorzusehen, kleine Klemmlängenverhältnisse vermieden werden [LH05]. Hinweise finden sich dazu neuerdings in VDI 2230-1:2014-12. Die Anwendung ist im Stahlbau zumeist auf höchstbeanspruchte Verbindungen großer Schraubendurchmesser, z. B. Ringflanschverbindungen und Fundamentanker, beschränkt. Im Gegensatz zu den drehenden Verfahren sind ziehende Verfahren in EN 1090-2 nicht geregelt. Ihr Einsatz ist üblicherweise auf Grundlage eines bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweises möglich [SS11], zum Beispiel ETA-13/0243.

Neben diesen beiden Arten von Verfahren existieren innovative Mischformen, deren Wirkung prinzipiell durch Drehen der Mutter erzeugt wird, wobei allerdings keine Torsionsbeanspruchung in die Schraube eingeleitet wird. Ein mehrteiliges mutternähnliches Spannelement [Oe14] oder eine mehrteilige Scheibe (Z-14.4-601) sorgen für eine Längung und damit Vorspannung der Schrauben ab einem Durchmesser M20 aufwärts.

Da die direkte messtechnische Erfassung der Vorspannkraft, d. h. der Schraubenkraft im Montagezustand, mit hohem Aufwand verbunden ist, ist es in der Praxis

erforderlich, indirekt auf die Vorspannkraft über die Verwendung sekundärer Messgrößen zu schließen. Dies sind hauptsächlich

- das Anziehdrehmoment,
- der Drehwinkel,
- der Gradient des Anziehdrehmomentes über dem Drehwinkel,
- die Längen- oder Lageänderung,
- die Größe und Anzahl von Impulsen sowie
- der hydraulische Druck.

Diese Steuerungs- und Überwachungsgrößen sind vielfach namensgebend für die unterschiedlichen Anziehverfahren. Sämtliche Messgrößen, die wiederum über mechanische, elektrische oder hydraulische Zusammenhänge ermittelt sind, unterliegen Streuungen und Toleranzen. Neben den direkten Einflüssen auf die sekundäre Messgröße ist zusätzlich die Beziehung zur unbekannten Vorspannkraft zu beachten, die weitere Unsicherheiten birgt. Für die drehenden Anziehverfahren ist dies vor allem die Reibung im gepaarten Gewinde und in der Auflagefläche der gedrehten Komponente.

### 2.5.2 Reibungsverhältnisse, k-Faktor und k-Klassen

Beim Anziehen durch Drehen der Mutter oder des Schraubenkopfes wird der größte Teil des eingebrachten Anziehdrehmomentes durch den Reibungswiderstand im gepaarten Gewinde und an der Auflagefläche aufgebraucht. Der übrige Rest, das Nutzdrehmoment, sorgt durch die Überwindung der Gewindesteigung für die Vorspannkraft. Das Reibungsverhalten unterliegt vielfältigen Einflüssen, die beispielsweise in [KTW07] erläutert werden. Dies sind zum Beispiel die Verwendung von Schmierstoffen, die Werkstoffe der Verbindungselemente und Bauteile, die Feingestalt und Formgenauigkeit der gepaarten Oberflächen sowie die Montagebedingungen im Hinblick auf die Anziehgeschwindigkeit und die Anzahl wiederholter Anziehvorgänge. Deren Auswirkungen werden durch die Reibungszahlen im Gewinde  $\mu_G$  und in der (Kopf-)Auflagefläche  $\mu_K$  beschrieben. Ihre Ermittlung erfolgt durch die experimentelle Bestimmung des Gewindemomentes  $M_G$  und des Kopfreibmomentes  $M_K$  sowie durch die Berücksichtigung der Geometrie der Reibflächen. Das erforderliche Anziehdrehmoment  $M_A$  zum Erreichen der Montagevorspannkraft  $F_M$  wird für metrische ISO-Gewinde mit einem Flan-



kenwinkel von  $60^\circ$  und der Gewindesteigung  $P$  entsprechend VDI 2230-1 wie folgt berechnet:

$$M_A = F_M \cdot \left( 0,16 \cdot P + 0,58 \cdot d_2 \cdot \mu_G + \frac{D_{km}}{2} \cdot \mu_K \right) \quad (2.4)$$

Dabei ist der Flankendurchmesser  $d_2$  des Schraubengewindes und der wirksame Durchmesser  $D_{km}$  für das Reibungsmoment in der Schraubenkopf- oder Mutterauflage zu verwenden.

Unter der Voraussetzung, dass die Reibeigenschaften in beiden Bereichen identisch oder zumindest im Verhältnis zueinander konstant sind, kann zur Vereinfachung auf die getrennte Bestimmung bzw. Berücksichtigung verzichtet werden. Dazu ist der Klammerausdruck in Gleichung (2.4) durch den dimensionslosen Faktor  $k$  ( $k$ -Faktor) und den Nenndurchmesser  $d$  zu ersetzen:

$$M = F \cdot k \cdot d \quad (2.5)$$

Der individuelle  $k$ -Faktor einer einzelnen Garnitur beschreibt die Qualität der vorhandenen Schmierung. Über Vorgaben zur absoluten Größe des  $k$ -Faktors sowie einer zulässigen Streubreite können die Reibeigenschaften für ein Los von Garnituren vereinheitlicht werden, so dass die Nutzung in einem festgelegten Verfahren möglich ist.

Die Qualität der Schmierung von Garnituren wird entsprechend EN 14399-1 in die  $k$ -Klassen K0, K1 und K2 eingeteilt, siehe Tabelle 2.1. Für die  $k$ -Klasse K0 werden keine Anforderungen gestellt. Dies bedeutet allerdings nicht, dass der Hersteller auf eine Schmierung verzichten kann oder die werksseitige Schmierung beeinträchtigt werden darf, da von ihr auch die Gebrauchseignung für die Montage abhängt, siehe Kapitel 2.5.3.

Die  $k$ -Klasse K1 wird erreicht bzw. nachgewiesen, indem alle individuellen Prüfwerte  $k_i$  innerhalb des geforderten Bereichs nach Tabelle 2.1 liegen. Die Anzahl der Proben für ein Garniturlos beträgt dabei mindestens fünf. Aus diesen fünf Prüfwerten ist unter Einhaltung des geforderten Bereichs theoretisch ein ungünstigster Variationskoeffizient von etwa 27 % erzielbar. Dieser übersteigt merklich den zulässigen Variationskoeffizienten für die  $k$ -Klasse K2 von 6 %, der einer maximalen Spannweite der Prüfwerte des  $k$ -Faktors von etwa 0,03 entspricht – gegenüber der Spannweite von 0,06 für  $k$ -Klasse K1. Mit dieser geringen Streuung ist für den Mittelwert  $k_m$  der Prüfwerte ein größerer Bereich von 0,10 bis 0,23 zulässig. Die Anforderungen an die Qualität der Schmierung, insbesondere im Hinblick auf die Streuungen, nehmen von  $k$ -Klasse K0 bis K2 zu.

**Tabelle 2.1.** Anforderungen an  $k$ -Klassen nach EN 14399-1**Table 2.1.** Requirements for  $k$ -classes to EN 14399-1

<b>k-Klasse</b>	<b>zu liefernde Information</b>	<b>Anforderung</b>
K2	Mittelwert $k_m$	$0,10 \leq k_m \leq 0,23$
	Variationskoeffizient $V_k$	$V_k \leq 0,06$
K1	individuelle Werte $k_i$	$0,10 \leq k_i \leq 0,16$
K0	kein $k$ -Faktor erforderlich	–

Die Bestimmung des  $k$ -Faktors und die Eingruppierung in eine  $k$ -Klasse erfolgt durch Anziehversuche an Garnituren entsprechend EN 14399-2. Der individuelle  $k$ -Faktor einer Prüfung ist aus der einzubringenden Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  und dem dazu erforderlichen Anziehdrehmoment  $M_i$  wie folgt zu ermitteln:

$$k_i = \frac{M_i}{d \cdot F_{p,c}} \quad (2.6)$$

In Bild 2.10 sind Anziehversuche entsprechend EN 14399-2 an HV-Garnituren exemplarisch dargestellt. Zehn individuellen Prüfungen an Garnituren der  $k$ -Klasse K1 – die bereits in [SSG13] zur Veranschaulichung von Anziehverfahren dienten – sind drei weitere Prüfungen an Garnituren aus demselben Los, allerdings ohne Schmierung, gegenüber gestellt. Durch die Normierung des Anziehdrehmomentes ist der ermittelte  $k$ -Faktor auf dem Niveau der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  unmittelbar ablesbar. Er liegt konform mit  $k$ -Klasse K1 zwischen 0,12 und 0,15, für die ungeschmierten Garnituren allerdings zwischen 0,24 und 0,26.

Durch die vereinfachte Erfassung der Reibungsverhältnisse mittels des  $k$ -Faktors ist keine Information über die tatsächliche kombinierte Beanspruchung der Schraube durch Normalspannungen (aus Vorspannkraft) und Torsionschubspannungen (aus Gewindemoment) vorhanden. Bei identischem  $k$ -Faktor kann die Torsionsbeanspruchung erheblich variieren, jeweils im Ausgleich mit dem Auflagemoment, das zur Beanspruchung und zum Vorspannen der Schraube nicht beiträgt.

Für die Auslegung und den Nachweis einer geschraubten Verbindung nach VDI 2230-1 wird die kombinierte Beanspruchung der Schraube auf Grundlage von Gleichung (2.4) berücksichtigt. Dies ist für vorgespannte Verbindungen im Stahlbau nicht erforderlich, da die Gebrauchseignung zum Vorspannen der verwendbaren Verbindungselemente – nach EN 14399 – für die anzuwendenden

Anziehverfahren – nach EN 1090-2 – unter den festgelegten Vorspann- und Beanspruchungsniveaus – nach EN 1993-1-8 – nachgewiesen werden muss, und zwar von den Herstellern der Garnituren. Die Nachweise für die Eignung zum Vorspannen werden nachfolgend erläutert.

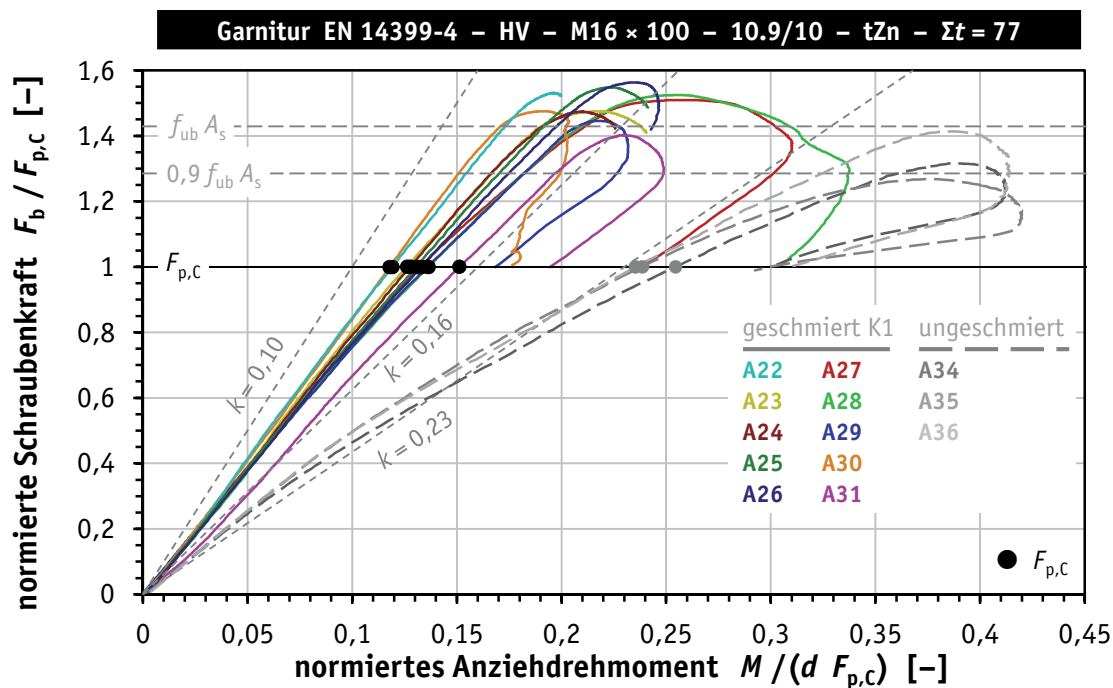
### 2.5.3 Gebrauchseignung der Verbindungselemente

Die Eignung zum Vorspannen, d.h. die Gebrauchseignung von Garnituren, wird durch Anziehversuche an diesen nachgewiesen. Der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung sowie die Versuchsauswertung sind dazu in EN 14399-2 geregelt. Der Nachweis erfordert die Bestimmung

- des Drehwinkels  $\Delta\theta_2$  zwischen dem erstmaligen Erreichen der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  und dem erneuten Unterschreiten von  $F_{p,c}$  oder dem Versagen der Garnitur beim Anziehen und
- der maximalen axialen Schraubenkraft  $F_{b,max}$ , die im Verlaufe des Anziehens erreicht wird.

So wird sichergestellt, dass ausreichende Reserven gegen übermäßiges Anziehen vorhanden sind und eine ausreichend hohe Schraubenkraft erreicht wird, ohne dabei die tatsächliche kombinierte Beanspruchung der Schraube einschließlich des Torsionsmomentes näher zu betrachten. Ungünstige Reibungsverhältnisse könnten somit durch ausreichend hohe Festigkeiten der Garnitur kompensiert werden, was allerdings aus wirtschaftlicher Sicht nicht anzustreben wäre.

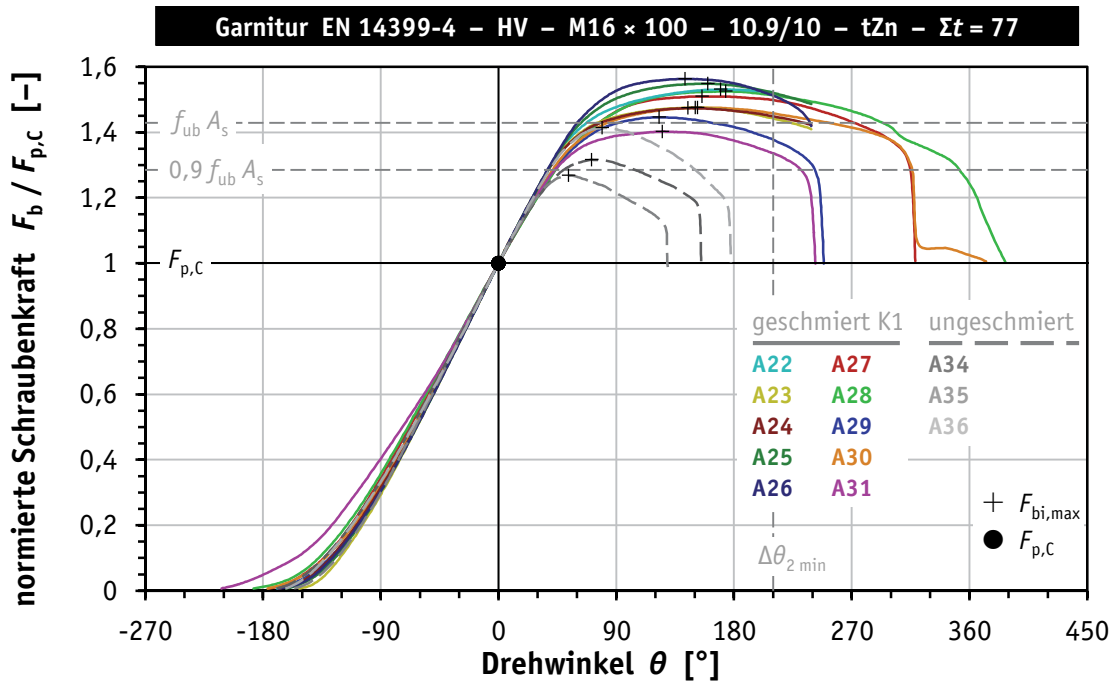
Bild 2.11 zeigt exemplarisch die Drehwinkel-Schraubenkraft-Kurven der Anziehversuche, die bereits in Bild 2.10 dargestellt sind. Beim erstmaligen Erreichen der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  erfolgte der Abgleich des Drehwinkels, so dass die Winkelzählung direkt das Ablesen des Weiterdrehwinkels  $\Delta\theta_2$  ermöglicht. Der Mindestweiterdrehwinkel  $\Delta\theta_{2,min}$  beträgt im vorliegenden Beispiel  $210^\circ$ , in Abhängigkeit von der Klemmlänge der Garnitur. Es ist ersichtlich, dass die geschmierten Garnituren den geforderten Weiterdrehwinkel erreichen und übertreffen. Für fünf Garnituren wurde die Prüfung bis zum Versagen durchgeführt, für fünf weitere nur bis zum erfolgreichen Nachweis der Anforderung, so dass die plastisch verformte Garnitur durch Losdrehen demontiert werden konnte.



**Bild 2.10.** Anziehdrehmoment-Schraubenkraft-Diagramm, Ermittlung des  $k$ -Faktors

**Figure 2.10.** Tightening torque-bolt load-diagram, determination of the  $k$ -factor

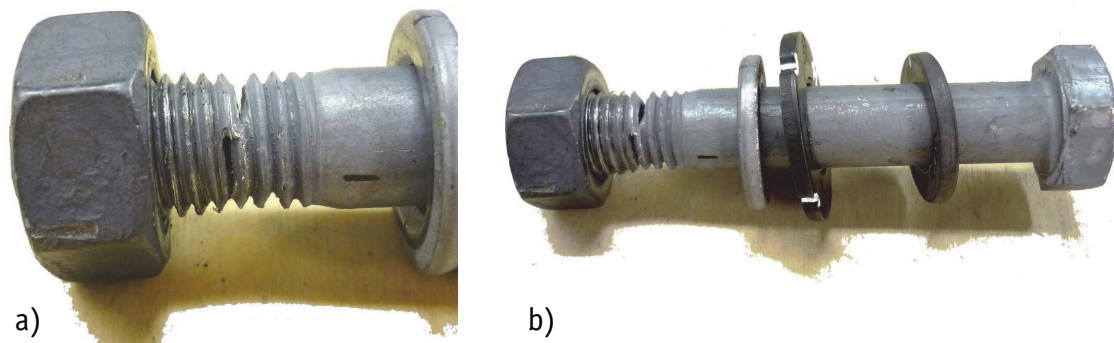
Das Versagen von drei der fünf Garnituren erfolgte durch den Bruch der Schraube im Übergang vom freien zum gepaarten Gewinde. Bild 2.12 zeigt exemplarisch einen vergleichbaren Bruch der Schraube aus einer Prüfserie mit identischen Garnituren, jedoch zuzüglich eines direkten Kraftanzeigers. Bei den beiden weiteren Garnituren kam es zum Abstreifen der gepaarten Gewindegänge. Die Auslegung der HV-Garnitur beruht auf genau diesem Versagensprinzip des Gewindeabstreifens, im Gegensatz zum allgemeinen Konstruktionsprinzip einer Schraubenverbindung, die den Bruch der Schraube, als schwächste und am einfachsten ersetzbare Komponente, vorsieht, siehe VDI 2230-1 sowie [KTW07]. Dieser Befund steht – im Übrigen neben weiteren unveröffentlichten Ergebnissen von Anziehversuchen an HV-Garnituren unterschiedlicher Durchmesser und Hersteller am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen – im Gegensatz zu anderen experimentellen Befunden [VPG98], [VH03] und den üblichen Beschreibungen des vorwiegenden Versagens von HV-Garnituren beim Anziehen durch Gewindeabstreifen [HV02]. Der vorliegende Befund bestätigt Ergebnisse von KLOOS ET AL. [KLS86], die beim übermäßigen Anziehen geschmierter feuerverzinkter HV-Garnituren sowohl den Bruch der Schraube als auch das Gewindeabstreifen feststellten.



**Bild 2.11.** Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm, Eignungsprüfung zum Vorspannen  
**Figure 2.11.** Angle of rotation-bolt load-diagram, suitability test for preloading

Es kann keinesfalls grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass HV-Garnituren beim übermäßigen Anziehen – warum auch immer – durch gutmütiges, da allmählich entlastendes Verhalten in Form vom Abstreifen des Gewindes reagieren. Ein solcher Versagenstyp ist zwar angestrebt, im Zuge des Nachweises der Gebrauchseignung aber nicht gefordert. In EN 14399-1 wird die HV-Garnitur als Typ charakterisiert, „*der konstruktiv so ausgelegt ist, dass die Duktilität vorwiegend durch die plastische Verformung der eingeschraubten Gewinde (Höhe der Mutter  $\approx 0,8 D$  und Schraube mit kurzer Gewindelänge) erreicht wird.*“ Dies ist aber keine Garantie für das tatsächliche Bruchverhalten beim Anziehen, auch bei Erfüllung der Anforderungen an die Gebrauchseignung. Weitere Hinweise, dass übermäßiges Anziehen in der Praxis tatsächlich vorgekommen ist, liefern LACHER [La84] sowie SCHMIDT ET AL. [SZB12].

Die maximale Schraubenkraft  $F_{bi,max}$  muss beim Anziehen ein Mindestniveau von  $0,9 f_{ub} A_s$  erreichen, siehe Bild 2.11. Die Reduzierung der nominellen Zugbruchkraft  $f_{ub} A_s$  um 10 % wird zugestanden, da die vorliegende Torsionsbeanspruchung beim Anziehen das maximal erreichbare Schraubenkraftniveau herabsetzt. Nach erfolgter Montage entweicht ein großer Teil der Torsionsbeanspruchung durch elastische Rückfederung, so dass Reserven für eine reine Zugbeanspruchung zur Verfügung stehen.



**Bild 2.12.** Bruch einer HV-Schraube beim Anziehen im ersten tragenden Gewindegang  
**Figure 2.12.** Failure of a HV-bolt while tightening at the first load-bearing thread turn

Ausführliche Erläuterungen zur Drehwinkel-Schraubenkraft-Kurve von Anziehversuchen und zur Auswertung dieser Versuche geben HASSELMANN & VALTINAT [HV02]. Einblicke in die europäische Entwicklung der Prüfung der Gebrauchseignung gewährt STARK [St01], der ebenso die Entstehung unterschiedlicher Systeme von Garnituren kommentiert und für den Einsatz von Anziehverfahren Empfehlungen ausspricht.

Für die unterschiedlichen Typen von Garnituren sind die Anforderungen an die beiden Gebrauchseigenschaften in den entsprechenden Teilen von EN 14399 geregelt. Für Garnituren der Systeme HR und HV sind die Anforderungen in Tabelle 2.2 zusammengestellt. Sie werden ergänzt durch die Anforderungen an die Garnitur im Zusammenwirken mit einem direkten Kraftanzeiger sowie der alleinigen Anforderung an den DTI, die gesondert erläutert werden. Die jeweilige Form der vorgeschriebenen Prüfung ist in Tabelle 2.2 zugeordnet. Die gewählten prägnanten Bezeichnungen werden im Rahmen dieser Arbeit genutzt. Sie sind nicht als solche in EN 14399 enthalten.

Der Nachweis der Gebrauchseigenschaften der vorspannbaren Verbindungselemente stellt sicher, dass die nachfolgenden Anziehverfahren mit den zugehörigen Anziehparametern und Anziehschritten zuverlässig ausgeführt werden können.

**Tabelle 2.2.** Anforderungen an die Gebrauchseignung zum Vorspannen nach EN 14399-3, -4 und -9 und erforderliche Prüfungen

**Table 2.2.** Requirements for suitability for preloading to EN 14399-3, -4 and -9 and required tests

Garnitur	Direkter Kraftanzeiger	Garnitur mit DTI
$F_{bi,max} \geq 0,9 f_{ub} A_s$ $\Delta\theta_{2i} \geq \Delta\theta_{2,min}^a$ $k$ -Klasse	$F_{p,C} \leq F_{0,4i} \leq 1,2 F_{p,C}$	$F_{bi}(n_{min}) \geq F_{p,C}$ $\Delta\theta_{2i} \geq 1,1 \Delta\theta_{2,min}^a$
Anziehversuche ohne Unterbrechung nach EN 14399-2	Drucklastversuche nach EN 14399-9	Anziehversuche mit/ohne Unterbrechung nach EN 14399-2
<sup>a</sup> in Abhängigkeit von der Klemmlänge $\Sigma t$ und vom System der Garnitur (HR, HV) unterschiedlich		

## 2.5.4 Anziehverfahren nach EN 1090-2

### 2.5.4.1 Allgemeines

Die entsprechend EN 1090-2 geregelten Anziehverfahren sind

- das Drehmomentverfahren,
- das kombinierte Vorspannverfahren (Drehmoment/Drehwinkel-Verfahren),
- das Verfahren mit HRC-Garnituren ("Twist Off" Type Tension Control Assemblies, Tension Control Bolts, Torshear Type High Strength Bolts) und
- das Verfahren mit direkten Kraftanzeigern (Compressible-Washer-Type Direct Tension Indicators, Tension/Load Indicating Washers).

Den entsprechenden Bezeichnungen ist zu entnehmen, dass die beiden letztgenannten Verfahren auf besonderen Verbindungselementen beruhen und diese zur Anwendung erforderlich sind. Diese Verfahren unterscheiden sich daher von den typischen Anziehverfahren, den beiden erstgenannten, für deren Ausführung eine gewöhnliche vorspannbare Schraubengarnitur ausreichend ist. Die zusätzlichen englischen Bezeichnungen stammen aus nationalen Regelwerken für entsprechend gleichartige oder identische Verfahren. Sie sind dementsprechend auch in der Literatur zu finden.

Die typischen und traditionellen Anziehverfahren werden mit besonderem Blick auf die Regelungen von EN 1090-2 u. a. in [SHM15], [SZB12], [SS11], [St01]

sowie [DP94] erläutert und kommentiert. Details zu den Verfahren mit HRC-Garnituren und direkten Kraftanzeigern werden zumeist allerdings nicht dargestellt. Dies mag an der weniger ausgedehnten Verbreitung liegen. So waren das Drehmoment- und das kombinierte Verfahren bereits in den *ECCS Recommendations* [ECCS85] feste Bestandteile, während HRC-Garnituren und direkte Kraftanzeiger als *andere Verfahren* zwar prinzipiell zugelassen, aber nicht näher spezifiziert waren.

Die Abhängigkeit der einzelnen Anziehverfahren von den Reibungsverhältnissen wird durch die Einschränkung der jeweils verwendbaren bzw. anzuwendenden  $k$ -Klassen berücksichtigt, siehe Tabelle 2.3.

**Tabelle 2.3.** Anziehverfahren und erforderliche  $k$ -Klassen nach EN 1090-2

**Table 2.3.** Tightening methods and required  $k$ -classes according to EN 1090-2

k-Klasse	Anziehverfahren			
	Drehmoment- verfahren	Kombiniertes Verfahren	Verfahren mit HRC-Garnituren	Verfahren mit DTI
K2	●	●	● <sup>a</sup>	● <sup>c</sup>
K1		●		● <sup>c</sup>
K0			● <sup>b</sup>	●

<sup>a</sup> für Garnituren mit HR-Muttern (EN 14399-10)  
<sup>b</sup> für Garnituren mit HRD-Muttern (EN 14399-10)  
<sup>c</sup> Kennzeichnung nur mit K0 zulässig (EN 14399-9)

Das Anziehdrehmoment ist für das Drehmomentverfahren und das kombinierte Vorspannverfahren die grundlegende Steuerungsgröße. Um diese als Anziehparameter festlegen und mitteilen zu können, werden in EN 1090-2 die sogenannten Referenz-Drehmomente  $M_{r,i}$  definiert, aus denen die Anziehparameter abgeleitet werden. In Abhängigkeit von der  $k$ -Klasse und den zu liefernden Informationen des Herstellers entsprechend Tabelle 2.1 werden diese wie folgt bestimmt:

$$M_{r,2} = k_m \cdot d \cdot F_{p,c} \quad \text{für } k\text{-Klasse K2} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} M_{r,1} &= k_m \cdot d \cdot F_{p,c} \\ &\approx 0,13 \cdot d \cdot F_{p,c} \quad \text{für } k\text{-Klasse K1} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Unter besonderen Umständen – z. B. bei der Notwendigkeit des Anziehens durch Drehen des Schraubenkopfes – ist das Referenz-Drehmoment  $M_{r,i}$  für die vorliegenden Lose auch durch eine *Kalibrierprüfung unter Baustellenbedingungen* nach



EN 1090-2, Anhang H bestimmbar. Es ist als Mittelwert  $M_m$  der erforderlichen Einzelprüfungen wie folgt zu bestimmen:

$$M_{r,\text{test}} = M_m = \sum_{i=1}^n M_i / n \quad (2.9)$$

Die Einzelwerte  $M_i$  des Anziehmomentes sind bei einer Vorspannkraft von  $F_{p,c}$  abzulesen, siehe exemplarisch Bild 2.10. Die zulässige Streuung der Einzelwerte ist dabei begrenzt und besonders zu beachten.

Entsprechend EN 14399-2 ist auf der Verpackung oder dem Etikett in Abhängigkeit von der vorliegenden  $k$ -Klasse mindestens ein verwendbares Anziehverfahren einschließlich der zugehörigen Anziehparameter zu nennen. Diese sind in Tabelle 2.4 zusammengestellt und werden nachfolgend für die einzelnen Verfahren dargestellt.

**Tabelle 2.4.** Anziehverfahren, Anziehparameter und Anziehschritte nach EN 1090-2

**Table 2.4.** Tightening methods, tightening parameters and tightening steps according to EN 1090-2

Anzieh- verfahren	k- Klasse	Anziehparameter	Anziehschritt	
			1.	2.
Drehmoment- verfahren	K2	$M_{r,2} = k_m d F_{p,c}$ $M_{r,\text{test}} = M_m$	Voranziehmoment $0,75 M_{r,i}$	Anziehmoment $1,10 M_{r,i} \triangleq$ $(1+1,65 V_k) M_{r,2}$
Kombiniertes Verfahren	K2 K1	$M_{r,2} = k_m d F_{p,c}$ $M_{r,1} = 0,13 d F_{p,c}$ $M_{r,\text{test}} = M_m$	und $\Delta\theta$ Voranziehmoment $0,75 M_{r,i}$	Weiterdrehwinkel $\Delta\theta$ abhängig von der Klemmlänge $\Sigma t$
HRC Anzieh- verfahren	K2 <sup>a</sup> K0 <sup>b</sup>	Definition des ersten Anziehschrittes durch Anziehgerätehersteller	<i>spätestens</i> bis der äußere Einsatz des Abscherschraubers zu drehen aufhört	Wegbrechen des Abscherendes der Schraube
Verfahren mit DTI	K2 <sup>c</sup> K1 <sup>c</sup> K0	Dicke der Fühllehre: 0,4 mm oder 0,25 mm abhängig von der Montagekonfiguration	„handfester“ Zustand bis zur beginnenden Verformung der Überstände	Anzahl der Sperr- weiten größer als die halbe Anzahl der Überstände

<sup>a</sup> für Garnituren mit HR-Muttern (EN 14399-10)

<sup>b</sup> für Garnituren mit HRD-Muttern (EN 14399-10)

<sup>c</sup> Kennzeichnung nur mit K0 zulässig (EN 14399-9)

#### 2.5.4.2 Drehmomentverfahren

Das Drehmomentverfahren ist eines der gebräuchlichsten Anziehverfahren in der Schraubtechnik, da die Steuerungsgröße – das Anziehdrehmoment – unmittelbar zugänglich ist. Sie kann direkt am Abtrieb des Werkzeugs durch Messung oder indirekt über die Beziehung zu den Leistungsgrößen des Anziehgerätes erfasst werden. Die Genauigkeit der Erfassung des Anziehdrehmomentes kann dabei sehr unterschiedlich sein.

Für ein ideales Anziehgerät wäre theoretisch keine Streuung des Anziehdrehmomentes bei der Erfassung und Regelung vorhanden. Es verbleibt aber dennoch die unvermeidbare Streuung der Reibungsverhältnisse, die die erzielbare Vorspannkraft bei einem vorgegebenen Anziehdrehmoment maßgeblich beeinflusst. Die Anziehgeräte sind demgegenüber mit hinreichenden Genauigkeiten verfügbar, so dass der Einfluss der Streuung der Reibungsverhältnisse schwerer wiegt [Ru92].

In der Regel ist die Garnitur durch Drehen der werksseitig geschmierten Mutter anzuziehen. Die angegebenen Anziehparameter sind nur für diese Art der Anwendung gültig. Ist kopfseitiges Anziehen erforderlich, so müssen die Anziehparameter durch den Hersteller oder durch eine Kalibrierprüfung nach EN 1090-2, Anhang H ermittelt werden.

Das Anziehen mit dem Drehmomentverfahren nach EN 1090-2 besteht mindestens aus den beiden folgenden Anziehschritten:

- 1. Anziehschritt: Aufbringen eines Anziehdrehmomentes von ca.  $0,75 M_{r,i}$ ,
- 2. Anziehschritt: Aufbringen eines Anziehdrehmomentes von  $1,1 M_{r,i}$ .

Bild 2.13 zeigt exemplarisch die bereits bekannten Anziehversuche in Form der Drehwinkel-Anziehdrehmoment-Kurven. Jede Kurve ist mit zwei Symbolen ( $\blacktriangle$ ) gekennzeichnet, die den ersten und zweiten Anziehschritt markieren. Da die dargestellten Anziehversuche mit kontinuierlichem Drehen nach Vorgabe von EN 14399-2 durchgeführt wurden, sind nach Fertigstellung der Anziehschritte weder die Rücknahme des Anziehdrehmomentes noch die Reduzierung der Vorspannkraft durch elastisches Rückfedern sichtbar.

Die Ermittlung des zugrunde liegenden Referenz-Drehmomentes  $M_r$  erfolgte durch die Auswertung der vorliegenden Versuche entsprechend Bild 2.10 und Gleichung (2.9). Für die zehn Einzelwerte der geschmierten Garnituren entspre-

chend  $k$ -Klasse K1 liegt ein Variationskoeffizient  $V_M$  von 7,3 % vor, der entsprechend EN 1090-2, Tabelle H.2 nicht zur Anwendung des Drehmomentverfahrens berechtigt ( $>6\%$ ). Wird der Mittelwert  $M_m$  trotzdem zur Bestimmung des Referenz-Drehmomentes  $M_{r,\text{test}}$  und zur Anwendung im zweiten Anziehschritt mit dem Anziehdrehmoment  $1,1 M_{r,\text{test}}$  genutzt, sind die Auswirkungen sichtbar. Diejenige Garnitur, die durch eine ungünstigere Schmierung bzw. einen größeren  $k$ -Faktor deutlich abweicht, siehe Bild 2.10, kann mit dem vorgegebenen Anziehdrehmoment nicht bis zur Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  vorgespannt werden, siehe Bild 2.14. Für die ungeschmierten Garnituren gilt dies gleichwohl in verheerenderem Maße. Die erzielbare Vorspannkraft liegt unterhalb von  $0,7 F_{p,c}$ .

Wird das ungünstige und abweichende Einzelergebnis aus der Bewertung herausgehalten oder zufällig nicht ermittelt, so ist mit den übrigen neun Einzelergebnissen ein Variationskoeffizient von 5,3 % zu erzielen. Nach den Bewertungskriterien von EN 14399-1 – für die werksseitige Prüfung und Klassifizierung – sowie von EN 1090-2, Anhang H – für die Kalibrierprüfung unter Baustellenbedingungen – wäre das Drehmomentverfahren anwendbar.

Der erste Anziehschritt lässt sich beliebig oft wiederholen oder in mehrere unterschiedlich große Schritte unterteilen. Für das Fügen von Anschlüssen mit mehreren Schrauben ist dies zu empfehlen, teilweise unabdingbar, um eine gegenseitige Entlastung benachbarter Verbindungselemente zu kompensieren.

Der zweite Anziehschritt ist ebenfalls wiederholbar, zum einen im Montageprozess, zum anderen nach beliebigen Intervallen, so dass Vorspannkraftverluste ausgeglichen werden können. Dies ist umso effektiver, je weniger äußere Einwirkungen, z.B. Temperaturänderungen und Bewitterung, die Reibungsverhältnisse der Garnituren verändern. In der Regel ist eine Verschlechterung zu befürchten, womit das ursprüngliche, höchstmögliche Vorspannkraftniveau bei gegebenem Anziehdrehmoment nicht mehr erreicht werden kann.

Das Wiederholen eines Anziehschrittes, vor allem des finalen Schrittes, ist allerdings nicht mit jeder Art von Anziehwerkzeug möglich. Elektrische Dreh-schrauber, deren Erfassung des Drehmomentes indirekt über die elektrische Stromaufnahme bei einer Nenndrehzahl erfolgt, sind dazu ungeeignet. Es ist ein vielfach höherer Anlaufstrom vorhanden, der zur Beschleunigung des Elektromotors aus dem Stand heraus auf die Nenndrehzahl erforderlich ist [Sc03]. Das dabei verfügbare Drehmoment ist bei jedem weiteren Anziehen der bereits vorgespannten Verbindung in der Lage, einen weiteren Drehwinkel aufzubringen, der zur

Überbeanspruchung der Verbindung führen kann. Würde die Erfassung der Stromaufnahme zur Kontrolle des Grenzwertes entsprechend dem vorgesehenen Drehmoment schon im Bereich des Anlaufens durchgeführt, so käme kein kontinuierliches Anziehen durch den elektrischen Drehschrauber zustande.

### 2.5.4.3 Kombiniertes Vorspannverfahren

Das kombinierte Vorspannverfahren wird in der allgemeinen Schraubtechnik auch als Drehmoment/Drehwinkel-Verfahren bezeichnet. Der Einfluss der Streuung der Reibungsverhältnisse wird gegenüber dem Drehmomentverfahren erheblich gemildert, indem das finale Anziehen auf einem definierten Weiterdrehwinkel basiert, der auch im überelastischen bzw. plastischen Bereich der Drehwinkel-Anziehdrehmoment-Kurve als Abschaltkriterium wirksam ist.

Ergänzende Informationen zur Herleitung und Absicherung des kombinierten Vorspannverfahrens liefern DUBOIS & PIRAPREZ [DP94].

Auch für das kombinierte Vorspannverfahren ist das Anziehen in der Regel durch Drehen der Mutter durchzuführen. So wie für das Drehmomentverfahren müssen die Anziehparameter durch den Hersteller oder durch eine Kalibrierprüfung nach EN 1090-2, Anhang H ermittelt werden.

Das Anziehen mit dem kombinierten Vorspannverfahren nach EN 1090-2 besteht aus den beiden folgenden Anziehschritten:

- 1. Anziehschritt: Aufbringen eines Anziehdrehmomentes von ca.  $0,75 M_{r,i}$ ,
- 2. Anziehschritt: Aufbringen eines Weiterdrehwinkels ( $\Delta\theta_{KV}$ ) in Abhängigkeit von der Klemmlänge  $\Sigma t$  der Garnitur.

Die Unterschiede des Drehwinkels bis zum Fügen der Bauteile (Beginn des linear ansteigenden Kurvenabschnittes) sind sogar in den dargestellten Kurven der Anziehversuche unter Laborbedingungen sichtbar, siehe Bild 2.11. Unter baupraktischen Bedingungen sind die möglichen Streuungen ungleich größer. Daher wird das einheitliche Fügen der Bauteile durch das Voranziehmoment im ersten Anziehschritt gewährleistet. Es werden so die erforderlichen, unterschiedlich großen Drehwinkel ab dem manuellen Aufschrauben der Mutter ausgeglichen, siehe Bild 2.15.

Mit dem zweiten Anziehschritt ist ein Weiterdrehwinkel als relative Verdrehung zwischen Mutter und Schraube aufzubringen. Die Wirkung dieses Weiterdrehwinkels ist abhängig von den Steifigkeiten der Verbindungselemente und der

Bauteile. Für die vorgegebenen Verbindungselemente und Konstruktionsmaterialien des Metallbaus kann diese Abhängigkeit vereinfachend mit der Klemmlänge  $\Sigma t$  der Garnitur beschrieben werden. Dieser stetige funktionale Zusammenhang ist zur Handhabung unter Baustellenbedingungen in drei Abschnitte unterteilt, so dass die anzuwendenden Weiterdrehwinkel leicht auszuführen und zu kontrollieren sind, siehe Tabelle 2.5.

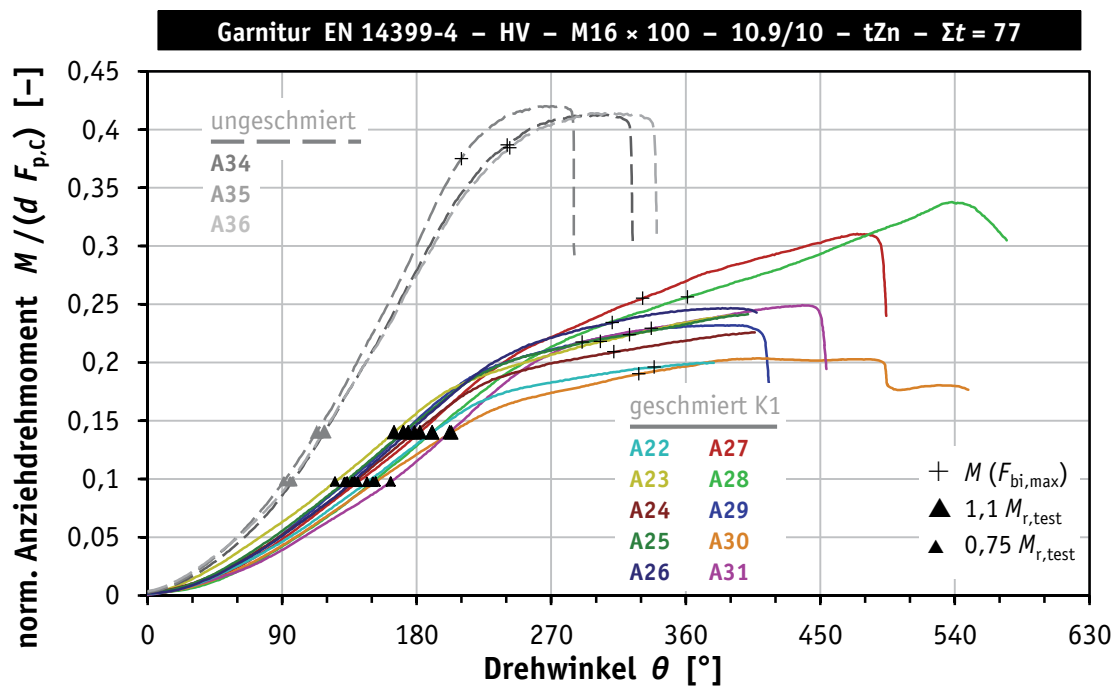
Der Anwendungsbereich einer bestimmten HV-Garnitur ist bezüglich der Klemmlänge durch das kurze Gewinde weit eingeschränkt. Mit Hilfe der zulässigen Klemmlängen entsprechend EN 14399-4 können den Nennlängen der HV-Schrauben die anzuwendenden Weiterdrehwinkel zugeordnet werden. Diese sind in Tabelle 2.5 zusammengestellt. Für die vorliegenden Anziehversuche ist mit der Klemmlänge  $\Sigma t/d = 4,8$  (77 mm) bzw. der Nennlänge  $l_{\text{nom}} = 100$  mm ein Weiterdrehwinkel von  $90^\circ$  aufzubringen.

**Tabelle 2.5.** Weiterdrehwinkel für das kombinierte Vorspannverfahren nach EN 1090-2 und Zuordnung der Nennlängen von HV-Schrauben nach EN 14399-4

**Table 2.5.** Further rotation for the combined method according to EN 1090-2 and corresponding nominal lengths of HV-bolts according to EN 14399-4

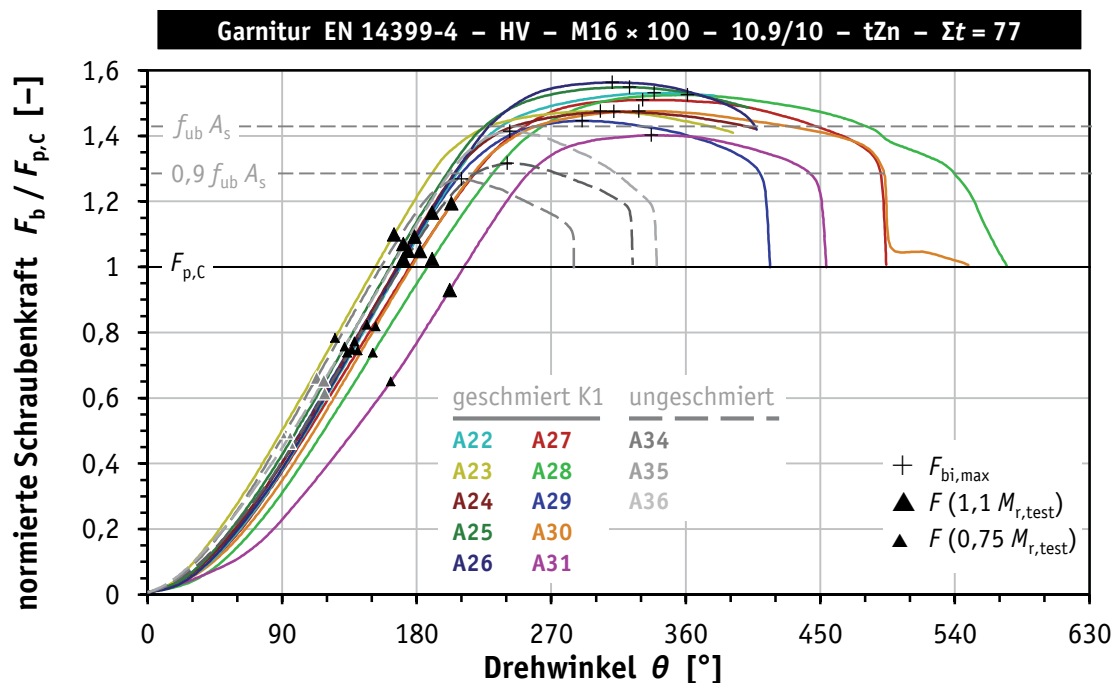
	Klemmlänge $\Sigma t$			
	$\Sigma t/d < 2$	$2 \leq \Sigma t/d < 6$	$6 \leq \Sigma t/d \leq 10$	$10 < \Sigma t/d$
Weiterdrehwinkel $\Delta\theta_{\text{kv}}$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	keine Empfehlung
Gewinde	Nennlänge $l_{\text{nom}}$ [mm]			
	von HV-Schrauben mit Klemmlängen nach EN 14399-4, Tabelle A.1			
M12	...35	45...85	95...130	135...
M16	...45	55...110	120...175	180...
M20	...60	70...140	150...220	225...
M22	...65	75...150	160...240	245...
M24	...70	80...165	175...265	270...
M27	...80	90...190	200...295	300...
M30	...90	100...210	220...330	335...
M36	...105	115...250	260...395	400...

Für die nicht aufgeführten Nennlängen von HV-Schrauben ist der anzuwendende Weiterdrehwinkel in Abhängigkeit von der tatsächlichen Klemmlänge zu bestimmen.



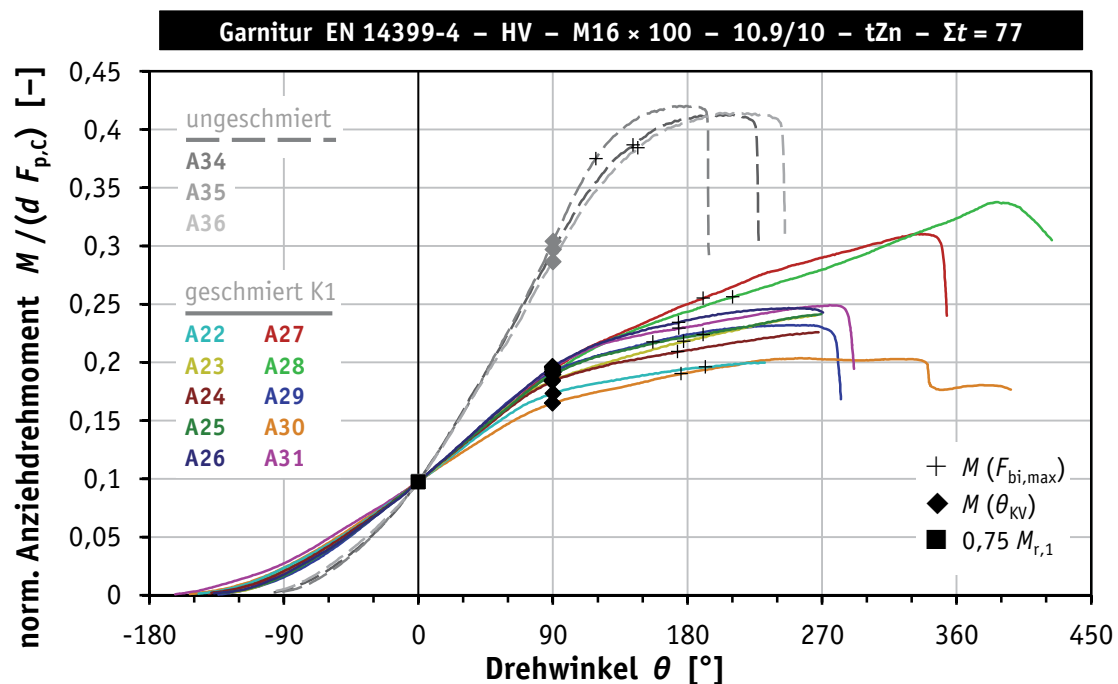
**Bild 2.13.** Drehwinkel-Anziehdrehmoment-Diagramm, Drehmomentverfahren

**Figure 2.13.** Angle of rotation-tightening torque-diagram, torque method

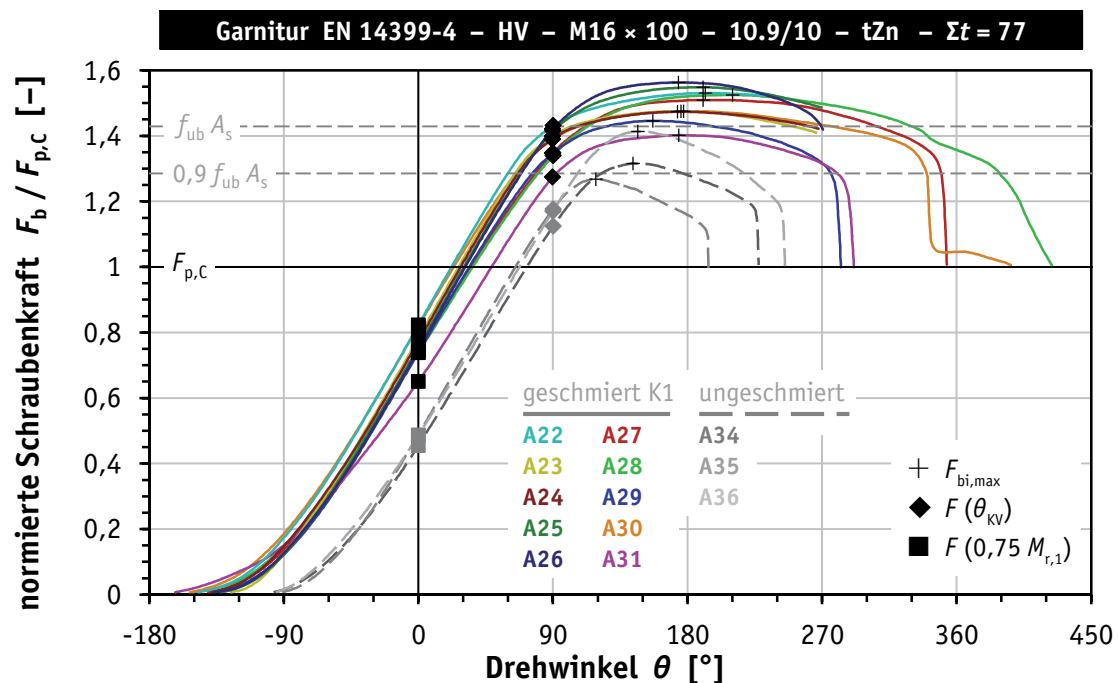


**Bild 2.14.** Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm, Drehmomentverfahren

**Figure 2.14.** Angle of rotation-bolt load-diagram, torque method



**Bild 2.15.** Drehwinkel-Anziehdrehmoment-Diagramm, kombiniertes Vorspannverfahren  
**Figure 2.15.** Angle of rotation-tightening torque-diagram, combined method



**Bild 2.16.** Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm, kombiniertes Vorspannverfahren  
**Figure 2.16.** Angle of rotation-bolt load-diagram, combined method

Bild 2.16 zeigt die erzielbaren Vorspannkkräfte (◆), die durch das Weiterdrehen um 90° vom ersten Anziehschritt (■) aus erreicht werden. Es ist ersichtlich, dass sich mit dem kombinierten Verfahren im Vergleich zum Drehmomentverfahren unter den gegebenen Bedingungen höhere Vorspannkkräfte erzielen lassen, vgl. Bilder 2.14 und 2.16. Sogar mit den außerordentlich ungünstigen Reibungsverhältnissen der ungeschmierten Garnituren werden ausreichend hohe Vorspannkkräfte erreicht. Dies ist möglich, da der Drehwinkel eine geeignete Steuerungsgröße für den überelastischen bzw. plastischen Bereich der Anziehkurve ist. Bei ausreichender Duktilität der Garnitur, die aufgrund der Anforderungen an die Gebrauchseignung vorhanden sein muss, bestehen ausreichende Reserven gegenüber der maximalen Beanspruchbarkeit beim Anziehen. Somit können geringfügige Plastizierungen zugelassen werden, in deren Bereich ein vorgegebenes Drehmoment nicht als sichere Abschaltgröße geeignet ist. Bei günstigen Reibungsverhältnissen wird ein voreingestelltes Anziehdrehmoment womöglich nicht erreicht und stattdessen das Anziehen bis zum Versagen der Garnitur fortgesetzt.

Ein wiederholtes Anziehen bzw. Nachziehen nach dem finalen zweiten Anziehschritt ist nicht ohne die Kenntnis des tatsächlich aufgebrauchten Anziehdrehmoments möglich. Sollte dies für eine jede individuelle Montage vorliegen, z. B. durch die Verwendung von Anziehgeräten mit entsprechenden Möglichkeiten zur Messung und Protokollierung der Anziehparameter [SZB12], wäre daraus die Ableitung eines geeigneten Anziehdrehmoments für die Kontrolle und das Nachziehen der Verbindung möglich. Eine erneute Anwendung des Weiterdrehwinkels ist nicht zulässig, da keinerlei Informationen über die tatsächliche plastische Verformung der Garnitur – womöglich durch mehrmaliges Nachziehen – vorliegen.

#### **2.5.4.4 Verfahren mit HRC-Garnituren ("Twist Off" Type Tension Control Assemblies)**

Das Anziehen von HRC-Garnituren nach EN 14399-10 erfolgt grundsätzlich durch die Einstellung und Begrenzung des aufgebrauchten Anziehdrehmomentes. Daher ist das Erreichen einer definierten Vorspannkraft beim Anziehen von definierten Reibeigenschaften der Garnitur im gepaarten Gewinde abhängig [KU96], in diesem besonderen Fall aber nicht von denjenigen in der Auflagefläche der Mutter. Die HRC-Schraube verfügt im Gegensatz zu herkömmlichen Sechskantschrauben über ein Abscherende, um das die Schraube am Gewindeende verlängert ist, siehe Bild 2.9 (e). Gewinde und Abscherende sind durch eine ringförmige



Nut als Sollbruchstelle getrennt. Das Abscherende ist als zwölfkantiger Außen-  
vielzahn ausgebildet, so dass neben der Sechskantmutter auf derselben Seite ein  
zweiter Kraftangriff an der Schraube vorhanden ist.

Ein passender Abscherschrauber verfügt über konzentrische Werkzeugeinsätze,  
die sowohl die Mutter als auch das Abscherende der Schraube erfassen. Durch  
die Kopplung beider Kraftangriffe ist ein Reaktionsarm zur Abstützung des An-  
ziehdrehmomentes am Anziehgerät nicht erforderlich. Das Anziehen erfolgt bis  
zum Wegbrechen des Abscherendes infolge des Anziehdrehmomentes, das somit  
durch die Querschnittsfläche an der Sollbruchstelle und die Festigkeit des Schrau-  
benwerkstoffes vorgegeben ist. Das Anziehdrehmoment muss dabei nicht vom  
Anziehgerät erfasst und verarbeitet werden. Es ist daher keine Kalibrierung erfor-  
derlich.

Das Anziehen von HRC-Garnituren besteht nach EN 1090-2 mindestens aus den  
beiden folgenden Anziehschritten:

- 1. Anziehschritt: höchstens Anziehen, bis der äußere Einsatz des  
Abscherschraubers zu drehen aufhört,
- 2. Anziehschritt: Anziehen, bis das Abscherende an der Sollbruchstelle  
wegbricht.

Der erste Anziehschritt kann beliebig oft wiederholt werden und muss für alle  
Garnituren einer Verbindung abgeschlossen sein, bevor der zweite Anziehschritt  
erfolgt. Ob es dem Monteur überlassen sein soll, z.B. durch einen wechselnden  
Klang des Abscherschraubers festzustellen, dass der erste Anziehschritt zu been-  
den ist, oder eine geeignete Automatik des Anziehgerätes dafür sorgt, ist dem Ge-  
rätehersteller nach EN 1090-2 offenbar freigestellt. Es sind Anziehgeräte verfü-  
gbar, die durch einen Kippschalter die Wahl des auszuführenden Anziehschritts  
erlauben.

Die HRC-Garnitur wird beim Anziehen nur zwischen dem gepaarten Gewinde  
und dem Abscherende durch Torsionsschubspannungen beansprucht. Der übrige  
Teil der Schraube im Bereich des Klemmpakets bleibt davon unberührt und ist  
ausschließlich durch die Vorspannkraft beansprucht. Ein Sechskantkopf ist daher  
für die HRC-Schraube entbehrlich, da kein Mitdrehen der Schraube verhindert  
werden muss. Entsprechend EN 14399-10 sind zwei unterschiedliche Ausführun-  
gen der HRC-Schraube möglich: Entweder mit dem herkömmlichen Sechskant-

kopf mit großer Schlüsselweite oder mit einem Halbrundkopf, der keinen Kraftangriff bietet.

Die Anforderungen an die Gebrauchseignung zum Vorspannen der HRC-Garnituren sind mit denjenigen für HR- und HV-Garnituren entsprechend Tabelle 2.2 vergleichbar. Obwohl die Schraube beim eigentlichen Anziehvorgang nicht durch das Anziehdrehmoment beansprucht wird, muss trotzdem nach dem Wegbrechen des Abscherendes der geforderte Weiterdrehwinkel  $\Delta\theta_{2,\min}$  durch herkömmliches Anziehen unter Torsionsbeanspruchung nachgewiesen werden. Die Anforderung ist nachvollziehbar, da HRC-Garnituren auch in der  $k$ -Klasse K2 geliefert werden können, so dass bei Bedarf das Anziehen oder ein Nachziehen mit dem Drehmomentverfahren durch Drehen der Mutter erfolgen kann. Ist kopfseitiges Anziehen – natürlich nur für die Variante mit Sechskantkopf – erforderlich, so müssen die Anziehparameter durch den Hersteller oder durch eine Kalibrierprüfung nach EN 1090-2, Anhang H ermittelt werden. Die Verwendung der HRC-Garnitur zusammen mit direkten Kraftanzeigern ist unabhängig von der  $k$ -Klasse möglich, allerdings eher ungewöhnlich.

Das Erreichen einer maximalen Schraubenkraft ist in der aktuellen Ausgabe EN 14399-1:2015 auch für HRC-Garnituren vorgesehen. Eine entsprechende Festlegung eines Grenzwertes ist in der derzeitigen älteren Ausgabe EN 14399-10:2009 nicht enthalten. Es gelten allerdings besondere Anforderungen für die beim Wegbrechen des Abscherendes erzielten Vorspannkräfte hinsichtlich der Größe und Streuung.

Die Benennung der HRC-Garnituren sowie des damit umsetzbaren Vorspannverfahrens ist in dieser Form erst mit der Entwicklung der Normengruppe EN 14399 eingeführt worden. Es handelt sich bei den HRC-Garnituren in ihrer Funktionsweise, dem Einsatzzweck und ihrer Form mit Halbrundkopf um *Torshear Type High Strength Bolts*, die 1965 in Japan entwickelt und fortan dort vermehrt eingesetzt wurden [Ya83]. Diese Garnituren sind in der japanischen Produktnorm JSS II09 geregelt und werden unter Berücksichtigung von [AIJ12] und [JSCE09] verwendet.

Über die aufkommende Verbreitung in Nordamerika berichten FISHER ET AL. [FKW79]. Der Einsatz der sogenannten “*Twist Off*” *Type Tension Control Structural Assemblies* erfolgt dort heute als Produkte entsprechend ASTM F1852 und ASTM F2280. Die Ausführung wird in der *Specification for Structural Joints Using*

*High-Strength Bolts* [RCSC14] geregelt, die auf Grundlage von praxisnahen Untersuchungen [TMB05] weiterentwickelt wurde.

LACHER [La84] erläuterte bereits 1984 die Vorteile der Tor-Shear-Schraube ausführlich. In Form der FUCHS HVA-(Hochfeste Vorspann-Abscher)-Schraube wurde das Montageprinzip mit Hilfe der allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-14.4-15 ab 1987 in Deutschland einsetzbar. Mangelnde Nachfrage, vgl. [SZB12], führte allerdings dazu, dass die Zulassung im Jahr 2002 nicht verlängert wurde und somit auslief. Eine Verwendung von HRC-Garnituren im allgemeinen Hochbau, wie sie das Titelbild einer neuen Publikation [UPU15] zeigt, ist in Deutschland eher unbekannt. Neuere Untersuchungen beschäftigten sich hingegen mit dem Einsatz in gleitfesten Verbindungen mit Langlöchern in Türmen von Windenergieanlagen [VFN10], [PHV15]. Eine Sonderform der HRC-Garnitur war ab 2009 durch die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-14.4-584 in Deutschland einsetzbar. An die Stelle des Schraubenkopfes tritt eine zweite Mutter, in die der spezielle Bolzen mit seinem zweiten Gewindeende eingeschraubt wird. Der Einsatz ist weiterhin durch die gültige europäische technische Zulassung ETA-13/0244 möglich und erfolgt zum Beispiel in gleitfesten Verbindungen in Bolted-Steel-Shell-Türmen für Windenergieanlagen (Z-14.4-656).

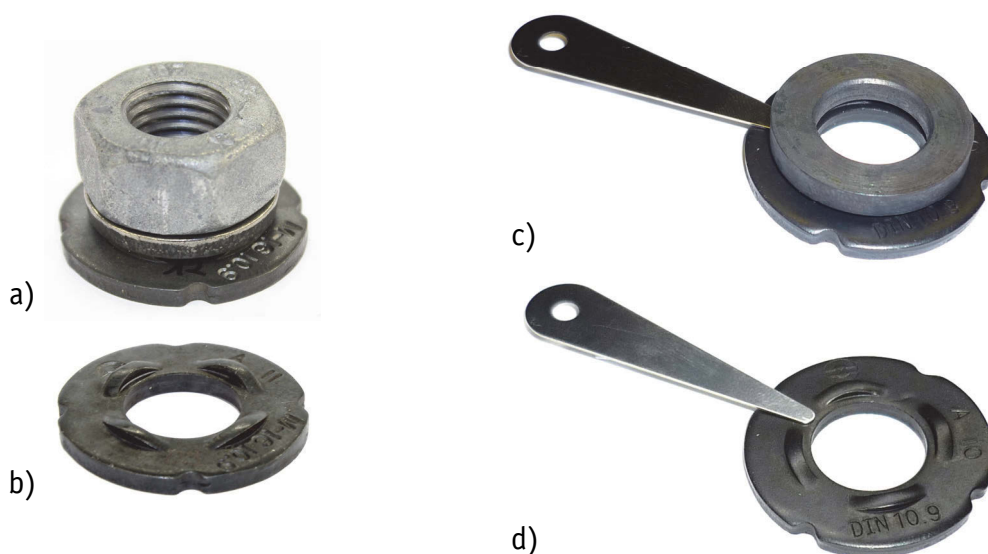
Die japanische Entwicklung der Tor-Shear-Schraube basiert auf dem ursprünglich in Großbritannien entwickelten *Torshear Bolt*, der über den herkömmlichen Sechskantkopf verfügte. Das Gewinde war durch eine umlaufende Nut unterteilt, an der das Abscherende mit normalem Gewinde wegbrechen konnte. Die Garnitur und deren Anwendung sind in [Go65] und [Be60] illustriert. Wie COSGROVE erläutert [SCI04], wurde der *Torshear Bolt* in seiner Verbreitung durch *Load Indicating Bolts*, siehe z.B. [Go65], und *Load Indicating Washers* ersetzt. Die erfolgreiche japanische Weiterentwicklung und Verwendung führte allerdings zur Rückkehr der Methode nach Großbritannien, so dass der Einsatz im hiesigen Normenkontext geregelt werden musste [Co05]. Die entsprechende Veröffentlichung – *SCI Publication P324* [SCI04] – kann als Grundlage zur Entwicklung von EN 14399-10 betrachtet werden.

#### 2.5.4.5 Verfahren mit direkten Kraftanzeigern (Compressible-Washer-Type Direct Tension Indicators)

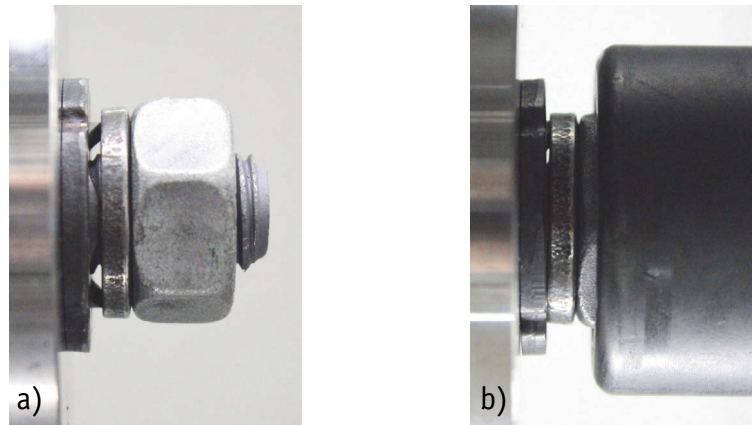
An dieser Stelle erfolgt eine Darstellung des Verfahrens mit direkten Kraftanzeigern entsprechend den Anwendungsregeln von EN 14399-9. Die internationale Verbreitung, unterschiedliche Anwendungsformen und -regeln sowie der Stand der Technik werden im nachfolgenden Kapitel 3 ausführlich behandelt.

Direkte Kraftanzeiger entsprechend EN 1090-2 und EN 14399-9 sind ausschließlich Scheiben mit gestanzten Überständen, siehe Bild 2.17 (b), deren plastisches Abplatten ein Maß für die einwirkende Schraubenkraft ist. Mit Hilfe einer Fühllehre mit definierter Dicke sind die Spalte zwischen den Überständen zu überprüfen, siehe Bild 2.17 (c) und (d). Kann die festgelegte Fühllehre in einen Spalt nicht eindringen, so ist dieser Spalt als Sperrweite zu zählen. Sobald mehr als die Hälfte aller vorhandenen Spalte – dies entspricht der Anzahl der Überstände – eine hinreichend geringe Höhe aufweisen und somit als Sperrweite gewertet werden können, ist das Erreichen der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  angezeigt und das Anziehen kann beendet werden, siehe Bild 2.18 (b).

Um ein übermäßiges Anziehen zu verhindern, dürfen nach EN 1090-2 „nicht mehr als 10 % der Anzeiger in einer Schraubengruppe einer Verbindung [...] eine vollständige Eindrückung des Anzeigers aufweisen.“ Das planmäßige vollständige Abplatten aller Überstände an allen Verbindungen ist somit ausdrücklich ausgeschlossen.



**Bild 2.17.** Direkter Kraftanzeiger, mutterseitige Scheibe und Anwendung der Fühllehre  
**Figure 2.17.** Direct tension indicator, nut face washer and checking with a feeler gauge



**Bild 2.18.** Anziehen mit DTI: zusammengefügt von Hand (a), vorgespannt im zweiten Anziehschritt bis Fühllehren-Kriterium (b)

**Figure 2.18.** Tightening with DTI: assembled by hand (a), preloaded in the second tightening step until the feeler gauge is refused (b)

Das Anziehen mit direkten Kraftanzeigern nach EN 1090-2 besteht aus den beiden folgenden Anziehschritten:

- 1. Anziehschritt: Anziehen bis zur beginnenden Verformung der Überstände des DTI, so dass ein einheitlicher „handfester“ Zustand erreicht ist,
- 2. Anziehschritt: Anziehen, bis die Anzahl der Sperrweiten die Hälfte aller vorhandenen Überstände übersteigt.

Im Rahmen dieser Arbeit sei die Vorgabe für den zweiten Anziehschritt als *Fühllehren-Kriterium* bezeichnet. Es besteht – im weitesten Sinne – aus zwei Anziehparametern, zum einen der geforderten Anzahl von Sperrweiten und zum anderen der entsprechenden Dicke für die anzuwendende Fühllehre, die gemäß Tabelle 2.6 vorgeschrieben ist.

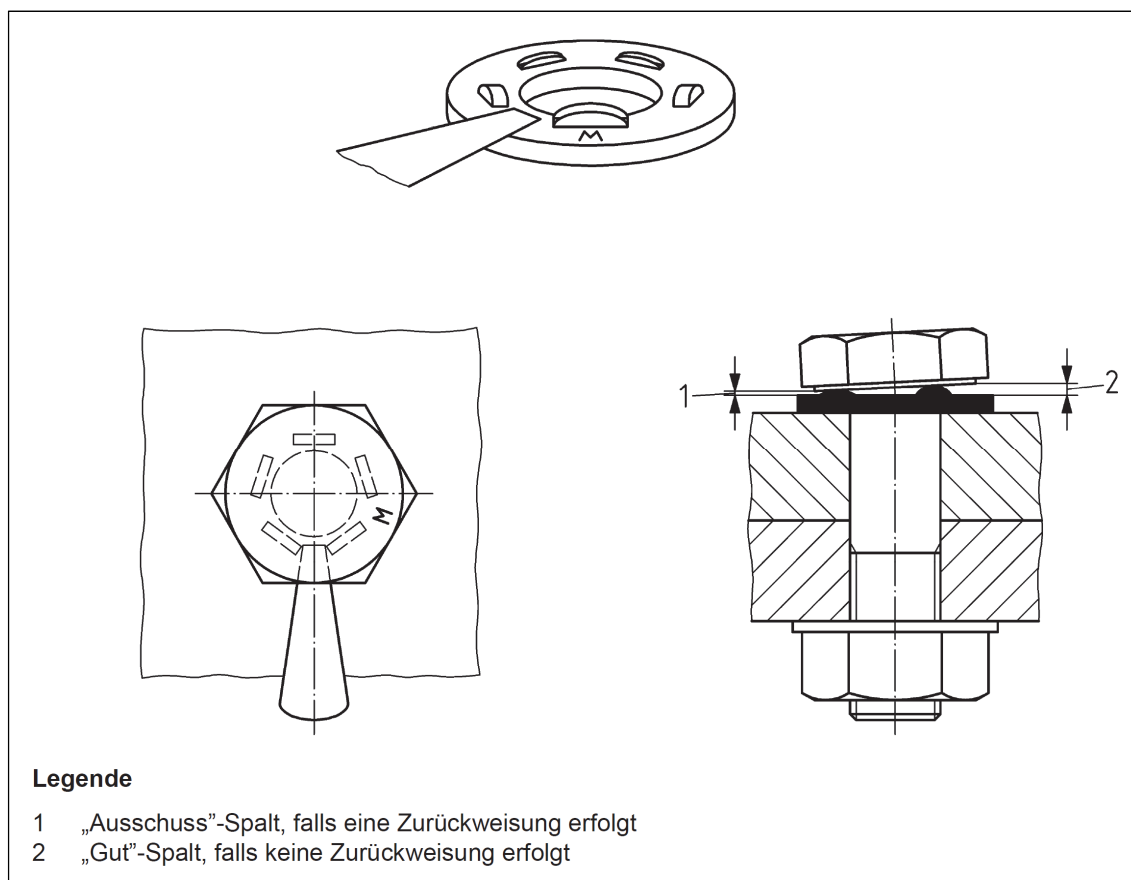
Durch die Anforderung, dass mehr als die Hälfte aller Spalte das Maß entsprechend Tabelle 2.6 unterschreiten müssen, ist gewährleistet, dass der mittlere Spalt bzw. die gemittelte Höhe der Spalte ebenfalls dieses Maß unterschreitet, unter Voraussetzung des Ebenbleibens der Auflagefläche auf den Überständen. Eine genauere Ermittlung des mittleren Spaltes ist nicht erforderlich. Dies wäre auch nur mit den beiden üblicherweise mitgelieferten Fühllehren – 0,4 mm und 0,25 mm dick – nicht möglich. Die Anwendung des Fühllehren-Kriteriums ist in EN 1090-2 entsprechend Bild 2.19 dargestellt.

**Tabelle 2.6.** Dicke der anzuwendenden Fühllehre entsprechend EN 14399-9**Table 2.6.** Thickness of the applicable feeler gauge according to EN 14399-9

Lage des direkten Kraftanzeigers	Dicke der Fühllehre [mm]
unter der nicht gedrehten (fixierten) Komponente ( <i>fix</i> )	0,40
unter der gedrehten Komponente ( <i>rot</i> )	0,25

Bedauerlicherweise heißt es in EN 1090-2 in Ergänzung des Fühllehren-Kriteriums: „Die an der anzeigenden Scheibe gemessenen Spalte dürfen bei der Beurteilung einer Garnitur gemittelt werden.“ Da die Anwendung des Fühllehren-Kriteriums die „Mittelung“ impliziert, bedarf es also keiner gesonderten Mittelung.

Direkte Kraftanzeiger sind entweder zusammen mit HR-Garnituren nach EN 14399-3 bzw. EN 14399-7 oder mit HV-Garnituren nach EN 14399-4 bzw. EN 14399-8 als zusätzlicher Bestandteil der Garnitur von einem Hersteller zu liefern, der die Gebrauchseignung garantiert, siehe Tabelle 2.2. Sie sind in beiden

**Bild 2.19.** Überprüfen des Spaltes des direkten Kraftanzeigers entsprechend EN 1090-2**Figure 2.19.** Checking the indicator gap according to EN 1090-2

Festigkeitsklassen – 8.8/8 und 10.9/10 – der Garnituren verfügbar. Die Kennzeichnung muss mit den Abkürzungen H8 bzw. H10 erfolgen.

Die Anordnung des direkten Kraftanzeigers innerhalb der Garnitur ist sowohl auf der Seite des Schraubenkopfes als auch auf der Seite der Mutter zulässig, siehe Bild 2.20. Hier sind die vorgeschriebenen Montagekonfigurationen in Anwendung der Festigkeitsklasse 10.9/10/H10 am Beispiel einer HV-Garnitur dargestellt. Für HR-Garnituren derselben Festigkeitsklasse erfolgt die Zusammenstellung der Garnitur einschließlich DTI und Scheiben analog, wobei die flache Scheibe mit Fase (EN 14399-6) unter der Mutter alternativ durch eine flache Scheibe ohne Fase (EN 14399-5) ersetzt werden darf.

Die Überstände des DTI dürfen keinesfalls zum Bauteil gerichtet sein, sondern müssen gegen eine Auflagefläche mit ausreichend hoher Härte anliegen, so dass nur die Überstände des DTI plastische Verformungen erleiden. Diese Auflagefläche wird in der Regel durch Scheiben mit besonders hoher Härte (372 HV bis 448 HV) gebildet, die in zwei unterschiedlichen Formen als erforderliche Ergänzungen zu den direkten Kraftanzeigern in EN 14399-9 beschrieben sind. Dabei handelt es sich zum einen um die mutterseitige Scheibe ohne Fase mit der Kennzeichnung HN, die sich durch einen kleineren und enger tolerierten Innendurchmesser von den gewöhnlichen Scheiben ohne Fase nach EN 14399-5 (Härte 300 HV bis 370 HV) unterscheidet. Zum anderen ist es die schraubenkopfseitige Scheibe mit Fase und der Kennzeichnung HB, die in ihrer Geometrie identisch mit den gefasten Scheiben nach EN 14399-6 (Härte 300 HV bis 370 HV) ist.

Das Anziehen der Garnitur ist sowohl durch Drehen der Mutter als auch des Schraubenkopfes zugelassen, siehe Bild 2.20. Dazu bedarf es im Gegensatz zum Drehmoment- und kombinierten Vorspannverfahren keiner gesonderten Ermittlung der Anziehparameter durch den Hersteller oder durch eine Kalibrierprüfung nach EN 1090-2, Anhang H. Die unterschiedliche Beeinflussung des DTI ist vor allem durch die Lage bezogen auf die gedrehte Komponente – Schraube oder Mutter – gegeben, weniger durch die Art der aufliegenden Komponente, da zu meist Scheiben dazwischen anzuordnen sind.

Für die Anwendung des DTI in der Festigkeitsklasse 8.8/8/H8 wird im Einklang mit den Vorgaben von EN 1090-2 der Einsatz einer geringeren Anzahl von Scheiben gestattet, siehe Bilder 2.21 und 2.22. Der Entfall einer Scheibe betrifft grundsätzlich nur diejenige Seite der Garnitur, auf der nicht das Anziehen durch Drehen erfolgt. Zwischen direktem Kraftanzeiger und Mutter ist jedoch grund-

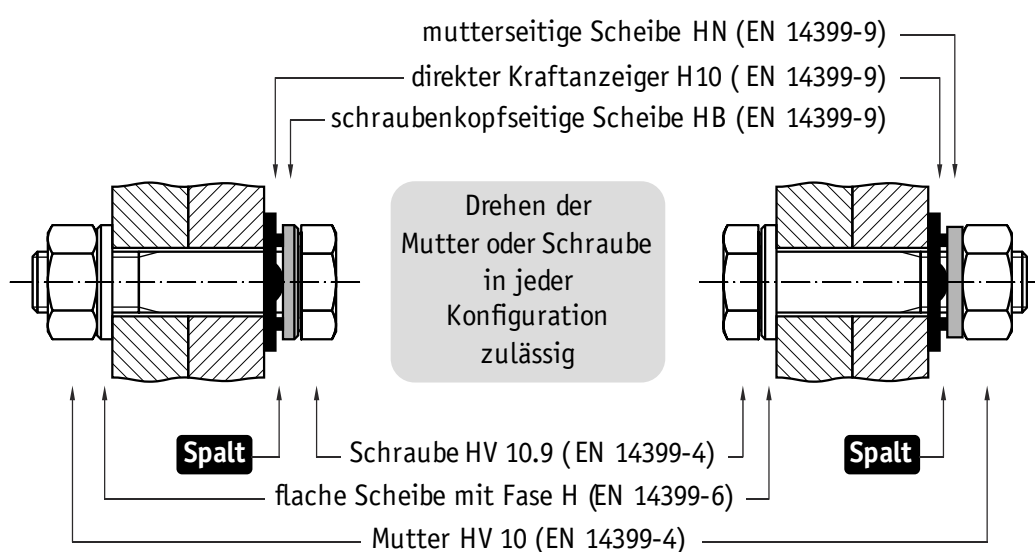
sätzlich die mutterseitige Scheibe anzuordnen, unabhängig von der gedrehten Komponente.

Weitere Erläuterungen und Kommentare zum Zweck und zu der Verwendung der einzelnen Montagekonfigurationen werden nachfolgend in Kapitel 3.5.3.1 gegeben. Die Kennzeichnungen *A* bis *D* in den Bildern 2.21 und 2.22 beziehen sich auf die Reihenfolge der Erläuterungen in EN 1090-2 und BS 7644-1. Die zusätzlichen Kürzel in der Form

*Position unter Komponente X . Zustand dieser Komponente*

werden zur anschaulichen Unterscheidung in den nachfolgenden experimentellen Untersuchungen verwendet; zum Beispiel Montagekonfiguration *Shr.fix* (*A*): DTI unter dem fixierten (nicht gedrehten) Schraubenkopf.

In Bild 2.23 sind die exemplarisch herangezogenen, bereits bekannten Anziehversuche zusammen mit Anziehversuchen an Garnituren aus demselben Los, allerdings in Kombination mit direkten Kraftanzeigern dargestellt, vgl. Kapitel 4.4 und Bild 4.27. Das Anziehen erfolgte durch Drehen der Mutter. Der direkte Kraftanzeiger war unter dem nicht gedrehten (fixierten) Schraubenkopf und der schraubenkopfseitigen Scheibe angeordnet (*Shr.fix*), siehe Bild 2.20. Es ist ersichtlich, dass ein direkter Kraftanzeiger den aufzubringenden Drehwinkel zum Erreichen der Mindestvorspannkraft gegenüber einer Garnitur ohne DTI vergrößert, infolge des erforderlichen Abplattens der Überstände. Das erforderliche Anziehdrehmoment ist in Bild 2.24 ablesbar.

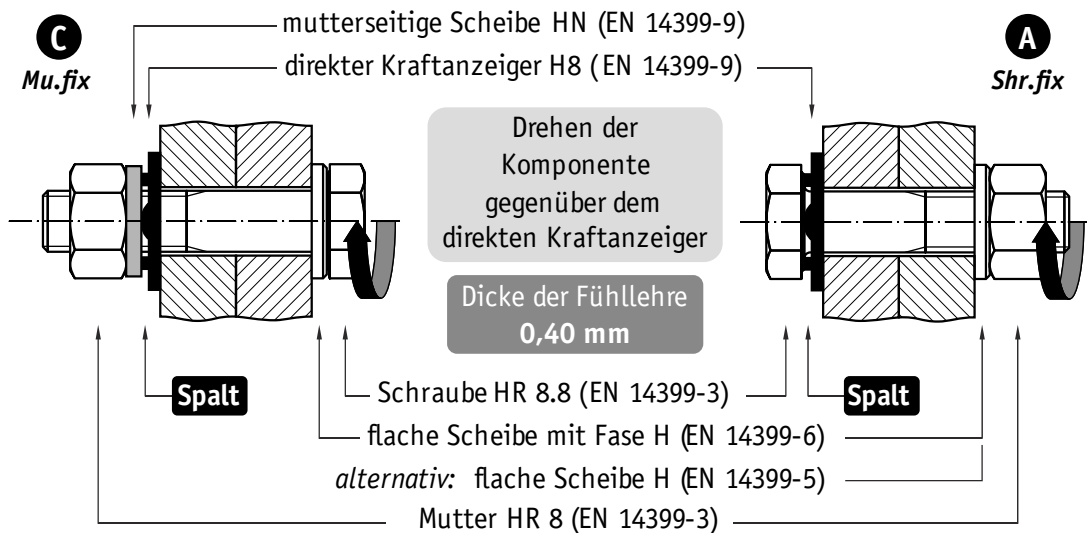


**Bild 2.20.** Konfigurationen von HV-Garnituren mit direkten Kraftanzeigern

**Figure 2.20.** Configurations of HV-assemblies with direct tension indicators

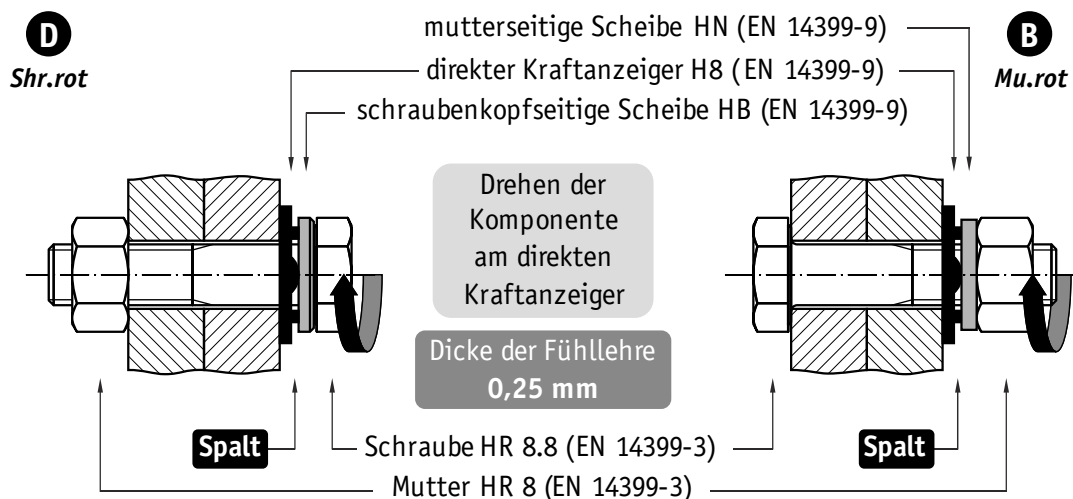


Die exemplarisch dargestellten Anziehversuche mit DTI sind Teil der experimentellen Untersuchungen, die nachfolgend detailliert erläutert werden, siehe Kapitel 4.4. Die Anzahl der Sperrweiten muss mit der entsprechenden Fühllehre bestimmt werden. Dazu wurde das Anziehen an definierten Vorspannkraftniveaus



**Bild 2.21.** Konfigurationen von HR-Garnituren (8.8) mit direkten Kraftanzeigern – Drehen der Komponente gegenüber dem direkten Kraftanzeiger

**Figure 2.21.** Configurations of HR-assemblies (8.8) with direct tension indicators – rotation of the component opposite to the DTI



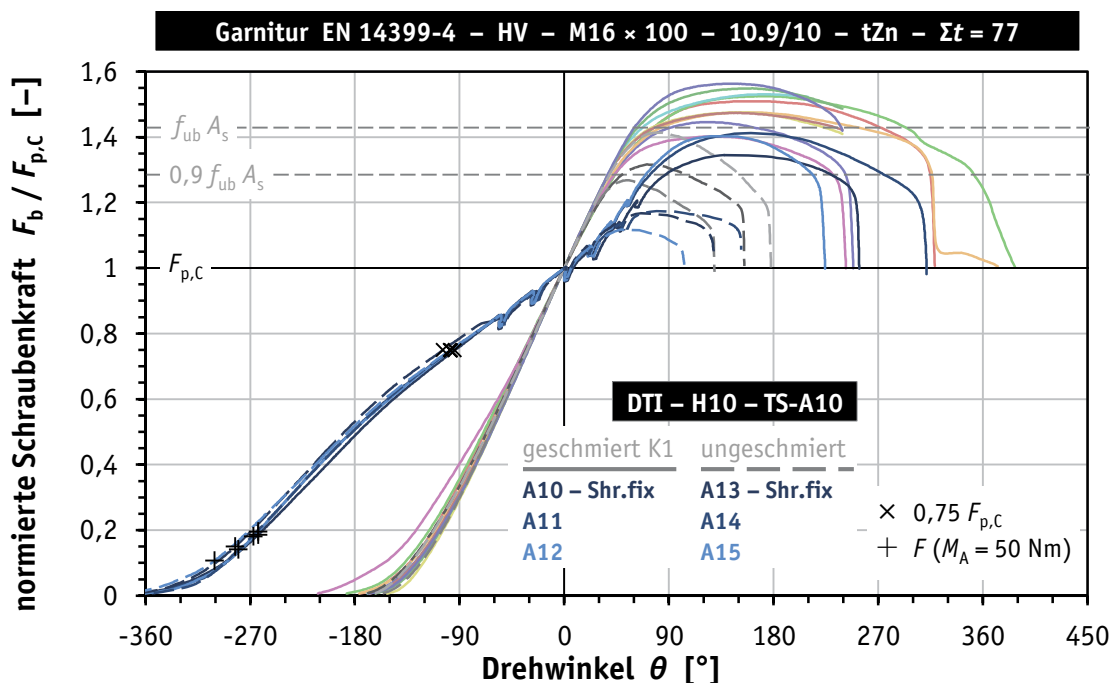
**Bild 2.22.** Konfigurationen von HR-Garnituren (8.8) mit direkten Kraftanzeigern – Drehen der Komponente auf dem direkten Kraftanzeiger

**Figure 2.22.** Configurations of HR-assemblies (8.8) with direct tension indicators – rotation of the component on the DTI

angehalten und das Anziehwerkzeug ausgekuppelt. In Bild 2.24 ist die Rücknahme des Anziehdrehmomentes für einen Versuch exemplarisch dargestellt. Für die übrigen Versuche sind die Kurvenabschnitte, die das Aus- und Einkuppeln des Steckschlüsseinsatzes betreffen, zur besseren Übersicht nicht dargestellt.

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass der Prüfablauf mit DTI – größerer Drehwinkel und Unterbrechungen – Einfluss auf die Reibungsverhältnisse hat, siehe Bild 2.24. Die entsprechenden  $k$ -Faktoren (●) der Garnituren mit DTI liegen sowohl für die geschmierten ( $k$ -Klasse K1) als auch für die ungeschmierten Garnituren deutlich oberhalb der Vergleichswerte. Schon vor der erstmaligen Unterbrechung des Anziehens ist die Entwicklung des Gradienten der Anziehdrehmoment-Schraubenkraft-Kurven mit DTI auffällig, so dass von einer Beeinträchtigung der vorliegenden Schmierung durch den größeren Drehwinkel ausgegangen werden muss. Ein Einfluss einer andersartigen Scheibe unter der gedrehten Mutter kann ausgeschlossen werden, da hier identische feuerverzinkte Scheiben nach EN 14399-6 zur Anwendung kamen, siehe exemplarisch Bild 2.12.

Da das Anziehen eines direkten Kraftanzeigers mit plastischen, irreversiblen Verformungen verbunden ist, ist der erste Anziehschritt in besonderer Weise von



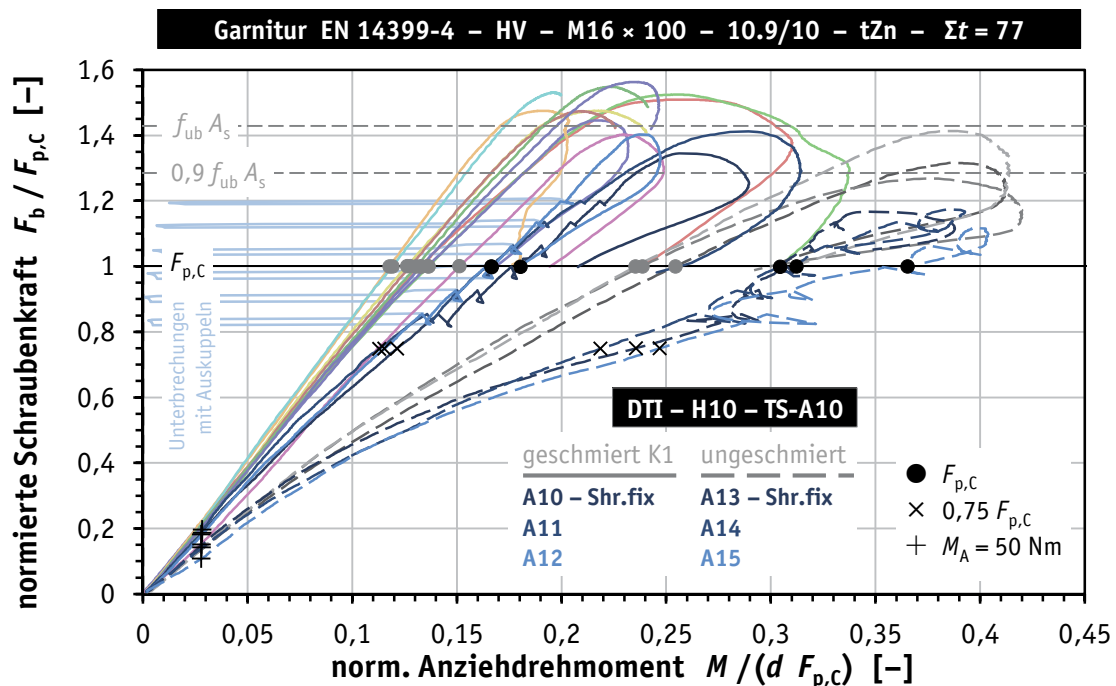
**Bild 2.23.** Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm, Anziehen mit DTI im Vergleich zum Anziehen ohne DTI entsprechend Bild 2.11

**Figure 2.23.** Angle of rotation-bolt load-diagram, tightening with DTI in comparison to the tightening without DTI according to Figure 2.11

Bedeutung. Sollte das Fühllehren-Kriterium im ersten Anziehschritt einer Garnitur bereits erreicht bzw. überschritten sein und das darauffolgende Anziehen benachbarter Garnituren zur Entlastung führen, wäre dieser Verlust an Vorspannkraft mit Fühllehren nicht zu detektieren. Die elastische Rückfederung der Überstände bei einer Entlastung wäre unter Baustellenbedingungen nicht zu erkennen, weder mit dem Auge noch mit der vorgeschriebenen Fühllehre. Die Abplattung der Überstände bleibt zudem erhalten.

Daher ist explizit ein „handfester“ Zustand mit beginnender Verformung der Überstände vorgeschrieben. Damit unterscheidet sich das Verfahren mit DTI gegenüber den anderen drei Verfahren, die für den ersten Anziehschritt eine weit aus höhere Vorspannkraft mit den vorgegebenen Anziehparametern ermöglichen. Außerdem ist dort das mehrmalige Wiederholen des ersten Schrittes problemlos möglich. Für den DTI erscheint dagegen ein gefühlvolles wiederholtes Anziehen bis zum leichten weiteren Abplatten der Überstände baupraktisch eher unrealistisch.

Da für das Anziehen mit DTI kein kalibriertes Anziehwerkzeug, weder im ersten, noch im zweiten Anziehschritt benötigt wird, muss davon ausgegangen werden, dass die preisgünstigsten und schnellsten Werkzeuge zur Anwendung kom-



**Bild 2.24.** Anziehmoment-Schraubenkraft-Diagramm, Anziehen mit DTI im Vergleich zum Anziehen ohne DTI entsprechend Bild 2.10

**Figure 2.24.** Tightening torque-bolt load-diagram, tightening with DTI in comparison to the tightening without DTI according to Figure 2.10

men. Dies sind zumeist Schlagschrauber, die keine Erfassung eines Drehwinkels und erst recht nicht eines Anziehdrehmomentes erlauben. Dementsprechend obliegt die definierte Ausführung der Anziehschritte in hohem Maße dem jeweiligen Monteur.

In den Bildern 2.23 und 2.24 ist jeweils der erste Anziehschritt als „handfester“ Zustand unter Annahme eines aufgebrachten Anziehdrehmomentes von 50 Nm gekennzeichnet (+). Damit konnte unter den gegebenen Bedingungen höchstens eine Vorspannkraft von  $0,2 F_{p,c}$  erreicht werden. Gegenüber dem Drehmoment- und kombinierten Verfahren – im Mittel im ersten Anziehschritt etwa  $0,75 F_{p,c}$ , siehe Bilder 2.14 und 2.16 – ist dies eine wesentlich geringere Vorspannkraft, die zum Fügen der Bauteile und Angleichen benachbarter Schraubenkräfte zur Verfügung steht. Um dasselbe mittlere Vorspannkraftniveau von  $0,75 F_{p,c}$  zu erreichen, wäre für diese Konfigurationen aus direktem Kraftanzeiger und Klemmpaket ein Weiterdrehwinkel von etwa  $180^\circ$  (×) notwendig. Diese Information steht dem Monteur allerdings nicht zur Verfügung. Es wäre schließlich eine individuelle Angabe je DTI-Los, Montagekonfiguration und Klemmlänge erforderlich. Es ist also von geringeren und stärker streuenden Vorspannkräften im ersten Anziehschritt mit direkten Kraftanzeigern auszugehen.

## 3 Direkte Kraftanzeiger – Stand der Technik

### 3.1 Entwicklung, Verbreitung und Anwendung

#### 3.1.1 Großbritannien

Der direkte Kraftanzeiger (engl. Direct Tension Indicator, DTI) wurde ursprünglich unter der Bezeichnung *Pre-Load Indicating Washer* (lastanzeigende Scheibe) als Entwicklung des britischen Unternehmens COOPER & TURNER LTD, Sheffield 1962 zum Patent angemeldet [Tu62]. Bild 3.1 zeigt die Darstellung aus der Patentschrift.

Aus dem scheibenförmigen Grundkörper aus Stahl sind in regelmäßigen Abständen Überstände herausgestanzt, deren Abplatten durch Umformen bzw. Fließen des Werkstoffs das Einwirken einer Kraft anzeigt. Die Höhe der verbleibenden Überstände ist aufgrund des bekannten Zusammenhangs zwischen Kraft und Verformung ein Maß für die Druckkraft. In einer Schraubengarnitur entspricht dies der Vorspannkraft in der Schraube.

Die Entwicklung des direkten Kraftanzeigers fällt in die Zeit, in der international – vgl. exemplarisch [WL60], [FB64], [Ch64], [CM65], [Ch65], [Ko64], [TT64], [TN64], [BW64], [SMV54], [SMV59], [SMV62], [SMV69] – wie auch in Großbritannien – vgl. exemplarisch [Be60], [Go65] – die Entwicklung der Schraubtechnik insbesondere durch das gezielte Vorspannen hochfester Schrauben zur Herstellung scherbeanspruchter gleitfester Verbindungen vorangetrieben wurde. In Großbritannien wurde der damalige Stand der Technik durch die Veröffentlichung von BS 4395:1969 (*High strength friction grip bolts and associated nuts and washers for structural engineering*) und BS 4604:1970 (*The use of high strength friction grip bolts in structural steelwork metric series*) festgeschrieben. Der jeweils erste Teil dieser Normen regelt Schraubengarnituren (HSFG-Garnituren) in Anlehnung an die Festigkeitsklasse 8.8 (*General grade*), der jeweils zweite Teil für die Festigkeitsklasse 10.9 (*Higher grade*). Die Festigkeitsklasse *General grade* entspricht dabei nur bis zum Nenndurchmesser M24 der Festigkeitsklasse 8.8. Darüber hinaus, ab Nenndurchmesser M27, sind geringere Anforderungen an die

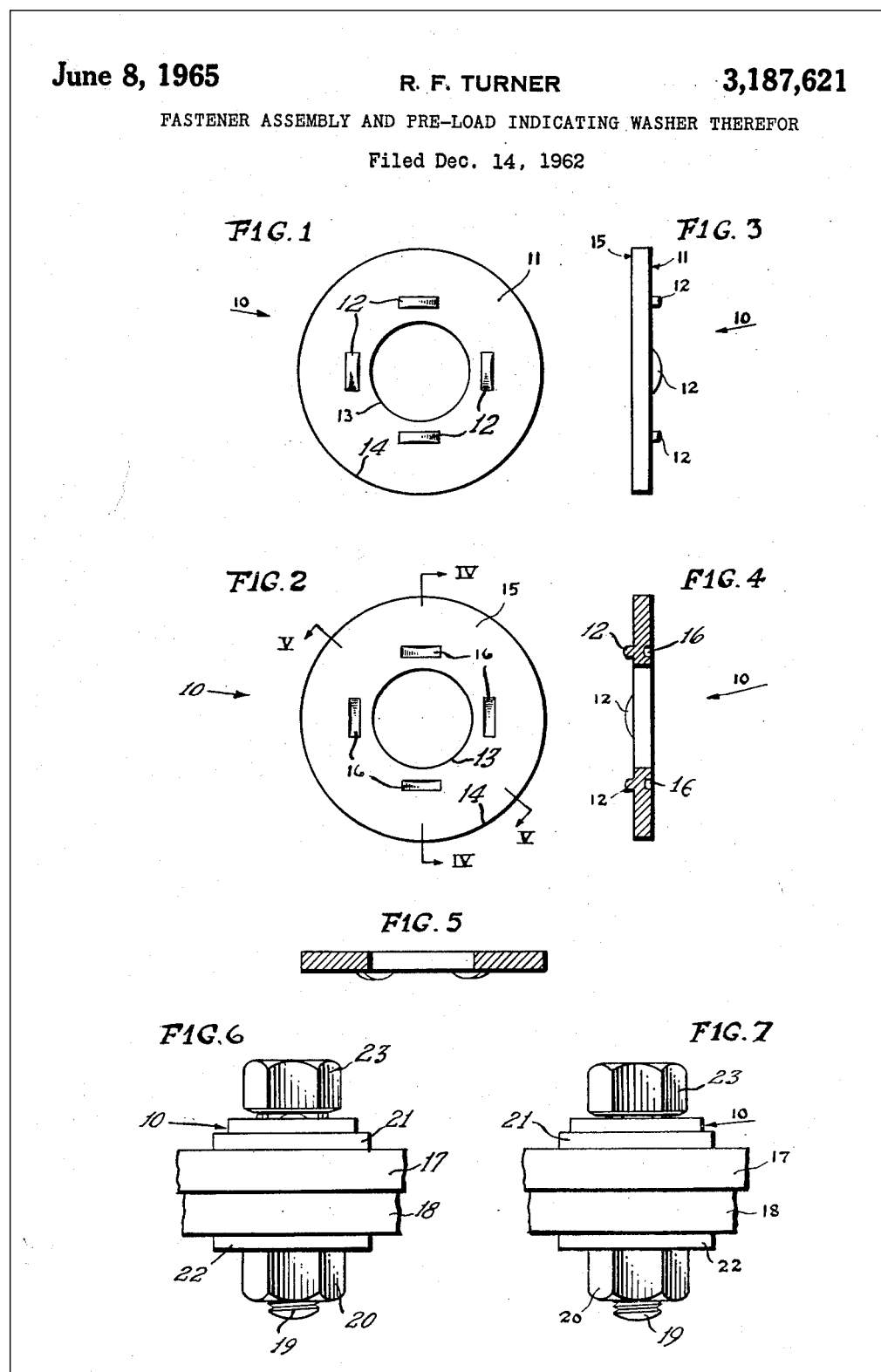
Zugfestigkeit und Streckgrenze gestellt, um die wirtschaftliche Herstellung mit identischem Ausgangsmaterial zu ermöglichen.

Die abgekürzte Form *HSFG bolts* bzw. *HSFG connections* wird mittlerweile international zum Teil auch für vorgespannte Verbindungen verwendet, die nicht planmäßig gleitfest ausgeführt sind. In Großbritannien wurde und wird allerdings der Aufwand des gezielten Vorspannens normalerweise nur für gleitfeste Verbindungen betrieben. Die ursprüngliche sprachliche bzw. sinngemäße Verknüpfung von Vorspannung und Gleitwiderstand ist daher plausibel.

Für das Anziehen der hochfesten vorspannbaren Garnituren wurde das Drehwinkelverfahren (*part-turn method*) und das Drehmomentverfahren (*torque-control method*) in BS 4604 explizit geregelt, wobei das Drehwinkelverfahren für Garnituren der Festigkeitsklasse 10.9 aufgrund von mangelnder Duktilität ausgeschlossen wurde. Diese durften aus demselben Grund nur unter Scherbeanspruchung verwendet werden. Neben der Mindestvorspannkraft (*minimum shank tension*) wurde speziell für die Festigkeitsklasse 10.9 auch eine höchstzulässige Vorspannkraft (*maximum shank tension*) vorgeschrieben.

Direkte Kraftanzeiger wurden zwar als solche nicht erwähnt, durch die Öffnung von BS 4604-1 und BS 4604-2 für weitere Verfahren (*tightening by other means*) waren sie allerdings anwendbar, sofern das Erreichen der Mindestvorspannkraft sichergestellt war. Dies hatte nach Vorgabe des Herstellers zu erfolgen. Die maximal zulässige Vorspannkraft musste für die Festigkeitsklasse 10.9 ebenso eingehalten werden.

Bild 3.2 erlaubt den Einblick in die damaligen Anwendungsregeln für direkte Kraftanzeiger, die allerdings mit dem Hinweis auf die Gültigkeit der aktuellen Informationen des Herstellers versehen sind. Es ist ersichtlich, dass die heute anzuwendenden Fühllehren entsprechend Tabelle 2.6 auf den damaligen Festlegungen basieren. Zum Erreichen der Vorspannkraft im vorgeschriebenen Bereich für die Festigkeitsklasse 10.9 wurden für die Höhe des Spaltes ebenso untere und obere Grenzen definiert. Wohlgemerkt handelt es sich hier um Angaben für die Höhe des Spaltes und nicht für die Dicke der anzuwendenden Fühllehren. Für eine regelkonforme Ausführung durfte beispielsweise eine Fühllehre der Dicke 0,5 mm *nicht in den Spalt eindringen*, um das Erreichen der Mindestvorspannkraft zu gewährleisten. Um eine übermäßige Schraubenbeanspruchung zu verhindern, musste eine Fühllehre der Dicke 0,4 mm *hingegen in den Spalt eindringen*.



**Bild 3.1.** Direkter Kraftanzeiger entsprechend der Patentschrift von TURNER [Tu62]

**Figure 3.1.** Direct tension indicator according to the patent of TURNER [Tu62]

Vor dem Hintergrund der im Rahmen dieser Arbeit gesammelten Erfahrungen mit der Verwendung von Fühllehren an direkten Kraftanzeigern ist festzuhalten, dass das Einstellen eines derart eingegrenzten Spaltes – wie für die Festigkeitsklasse *Higher grade* gefordert – ausgesprochen aufwändig und baupraktisch nahezu unmöglich ist. Eine sehr geringe Verbreitung der Festigkeitsklasse *Higher grade* in Großbritannien ist auch deshalb nachvollziehbar.

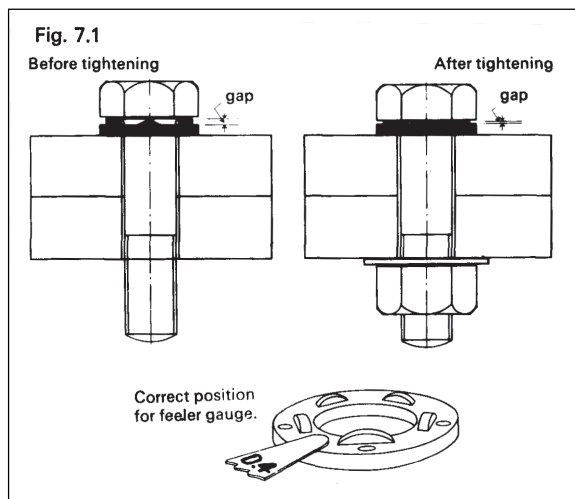


TABLE 7.2  
Load Indicator average gaps after tightening

LOAD INDICATOR FITTING	B.S. 4395 METRIC SERIES		
	General Grade Part 1	Higher Grade Part 2	
Under bolt head Black finish bolts	0.40 mm	Max. 0.50 mm	Min. 0.40 mm
All Platings except spun galvanised bolts	0.40 mm	0.50 mm	0.40 mm
Spun galvanised bolts	0.25 mm	0.35 mm	0.25 mm
Under nut with nut face washer nut face washer finishes	0.25 mm	0.35 mm	0.25 mm

**Bild 3.2.** Anwendungsregeln für direkte Kraftanzeiger entsprechend [BP78]

**Figure 3.2.** Rules of application for direct tension indicators according to [BP78]

In der rückblickenden Betrachtung sprechen WILLIAMS & REED [WR03] im Zuge der Einführung von BS 4604-1 und -2 von der Berücksichtigung von *drei* unterschiedlichen Anziehverfahren, einschließlich der direkten Kraftanzeiger, obwohl diese namentlich nicht genannt sind. Dass BS 4604 direkte Kraftanzeiger nicht nennt, mag wohl auch mit dem damals anhaltenden Patentschutz zu begründen sein.

Übereinstimmend berichten verschiedene Autoren, dass sich das Verfahren mit direkten Kraftanzeigern zum bevorzugten und am weitesten verbreiteten Anziehverfahren im Hochbau in Großbritannien entwickelt hat, vgl. [BP78], [OC89], [WR03], [Co05]. Eine entsprechende Aussage ist für den Brückenbau nicht zu finden. Das Verfahren mit DTI ist dort zwar auch zugelassen – und zwar gegenüber den übrigen Anziehverfahren nach EN 1090-2 ohne weitere Anmerkungen oder Einschränkungen [DfT14] – doch wurde die Auswahl der Anziehverfahren nach EN 1090-2 in Großbritannien um ein modifiziertes kombiniertes Verfahren (*part-turn method*) erweitert. Dieses war entsprechend der *Model Pro-*



*ject Specification for the Execution of Steelwork in Bridge Structures* [SCI12] – wie auch für den Hochbau gemäß der *National Structural Steelwork Specification for Building Construction* [BCSA10a] – nur für HR-Garnituren der Festigkeitsklasse 8.8 in den Nenndurchmessern M24 und M30 einsetzbar. Mittlerweile ist dieses modifizierte kombinierte Verfahren (*part-turn method*) entsprechend der *Specification for Highway Works, Series 1800: Structural Steelwork* [DfT14] auf Abmessungen von M16 bis M30 erweitert worden. Mit einem verringerten Voranziehmoment und einem vergrößerten Weiterdrehwinkel ist die Abhängigkeit von den Reibungsverhältnissen der Garnitur noch weiter reduziert, so dass HR-Garnituren der *k*-Klasse K0 verwendet werden dürfen. Somit ist ein alternatives Anziehverfahren für die in Großbritannien ausschließlich in der *k*-Klasse K0 hergestellten und verbreiteten HR-Garnituren gegeben. Es ist wohl das bevorzugte Anziehverfahren im Brückenbau in Großbritannien [SCI15].

Die geringere Verbreitung des DTI im Brückenbau ist insbesondere durch die nach der Montage zurückbleibenden Spalte zu begründen. Für Brücken aus wetterfesten Stählen ist die Verwendung von direkten Kraftanzeigern aus ebenso wetterfestem Stahl – die durchaus verfügbar sind – nicht zulässig [BCSA10b], da grundsätzlich nach EN 1090-2 verboten. Falls eine Beschichtung als Korrosionsschutz auf die montierte Brücke aus herkömmlichem Stahl aufgebracht werden soll, so müssen die Spalte der direkten Kraftanzeiger versiegelt werden. In *Series 1900: Protection of Steelwork Against Corrosion* [DfT14] heißt es gezielt auf direkte Kraftanzeiger bezogen:

*„Gaps shall be sealed by brush application of primer and successive undercoats, of the types used on adjacent areas.“* [DfT14]

Der entsprechende Aufwand macht die Verwendung von direkten Kraftanzeigern vermutlich unattraktiv.

### 3.1.2 Nordamerika

Dies erkannten auch bereits frühzeitig die am Bau Beteiligten in Nordamerika, wo der direkte Kraftanzeiger ab 1972 nach der Gründung der COOPER & TURNER INC in Lizenz von der BETHLEHEM STEEL CORP hergestellt und unter dem Namen *„Coronet“ Load Indicator* vertrieben wurde.

FISHER ET AL. kommentieren 1979 die Verwendung von direkten Kraftanzeigern folgendermaßen:

*„The time required to measure the gap and the cost of the washers has limited the acceptance of this device. These washers have not been generally accepted for use*

in bridges in North America due to **possible corrosion problems as a result of the gap.**” [FKW79], S. 6.

„The time required to accurately measure the washer gap is too long to be economically feasible. **Spot measurements of the gap are normally made.**“ [FKW79], S. 9.

KULAK ET AL. teilen 1987 abermals mit, wie die benötigte Zeit zur Kontrolle der Spalte abgekürzt wird:

„Because of the time required to measure the gap, **only spot measurements are usually taken**, and care must be exercised to ensure that the protrusions bear against a hardened surface and do not turn as the nut is turned onto the bolt.“ [KFS01], S. 59.

Direkte Kraftanzeiger waren mindestens seit 1981 in Nordamerika in ASTM F959 genormt, vgl. [JMT81]. In der RCSC *Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts* [RCSC85] wurden ab 1985 auch direkte Kraftanzeiger berücksichtigt [KFS01]. Sie sind in der aktuellen Ausgabe 2014 [RCSC14] fest verankert. Weitere Details hierzu folgen in Kapitel 3.5.3.3.

Mit der Richtlinie wurde 1985 ferner eingeführt, dass eine Kalibriervorrichtung für vorzuspannende Schrauben auf der Baustelle zu verwenden ist, nicht nur bei der Verwendung von DTI, sondern für alle Anziehverfahren. Mit der Neuaufnahme des Verfahrens mit direkten Kraftanzeigern in die Richtlinie musste nochmals klargestellt werden, dass direkte Kraftanzeiger nicht den aktuellen Zustand der Vorspannung anzeigen können:

„A tension-indicating bolt calibrator is now required at the job site so that the bolt-nut assembly can be shown to provide the required tension, to check out bolt crews on proper installation procedures and load indicator devices, and to calibrate impact and inspection wrenches. It is also made clear that the proper installation procedures must be verified by on-site inspection. **Post-installation inspection through the use of twist-off bolts or load-indicating washers do not provide evidence that the proper preload is present**, as sometimes claimed by suppliers of these products.“ [YFP87] S. 3.

Die AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications* [AASHTO12] ermöglichen heute grundsätzlich den Einsatz von direkten Kraftanzeiger nach ASTM F959 im Brückenbau. Der Einsatz von direkten Kraftanzeigern, die verliersicher mit der Mutter verbunden sind, siehe Kapitel 3.4, oder von der Produktnorm abweichen,

indem z.B. die Hohlräume mit Silikon gefüllt sind, siehe Kapitel 3.4, dürfen nach projektspezifischer Festlegung bzw. Zulassung („*subject to the approval of the Engineer*“ [AASHTO12], S. 6-27) ebenso verwendet werden. Zusammen mit den entsprechenden Schrauben, Muttern und Scheiben sowie Bauteil-Werkstoffen ist eine Ausführung in wetterfestem Stahl (*Type 3*) möglich. Die Ausführung von Installation und Kontrolle der direkten Kraftanzeiger ist in den *AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications* [AASHTO10] geregelt.

### 3.1.3 Asien

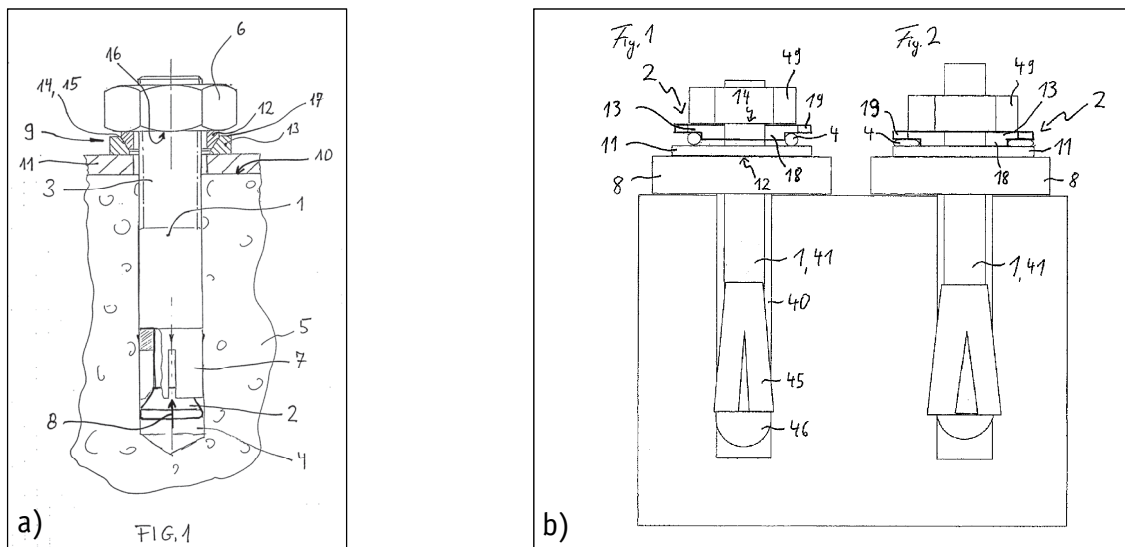
Über die vergangene oder aktuelle Anwendung von direkten Kraftanzeigern in Asien liegen keine Erkenntnisse vor. Die Verwendung im Einflussgebiet der ehemaligen britischen Kronkolonien erscheint allerdings sehr wahrscheinlich.

In Japan hat sich die Anwendung von direkten Kraftanzeigern nicht verbreitet. Stattdessen war und ist das Drehmomentverfahren sowie das Verfahren mit *Torshear Type High Strength Bolts* – vergleichbar mit HRC-Garnituren, vgl. Kapitel 2.5.4.4 – sehr beliebt [FKW79]. Zusammen mit dem Drehwinkelverfahren sind diese Verfahren in [AIJ12] spezifiziert. Einblicke in Konstruktion und Klassifizierung von geschraubten Anschlüssen – speziell im Brückenbau – gewähren KITADA ET AL. [KYM02].

### 3.1.4 Deutschland

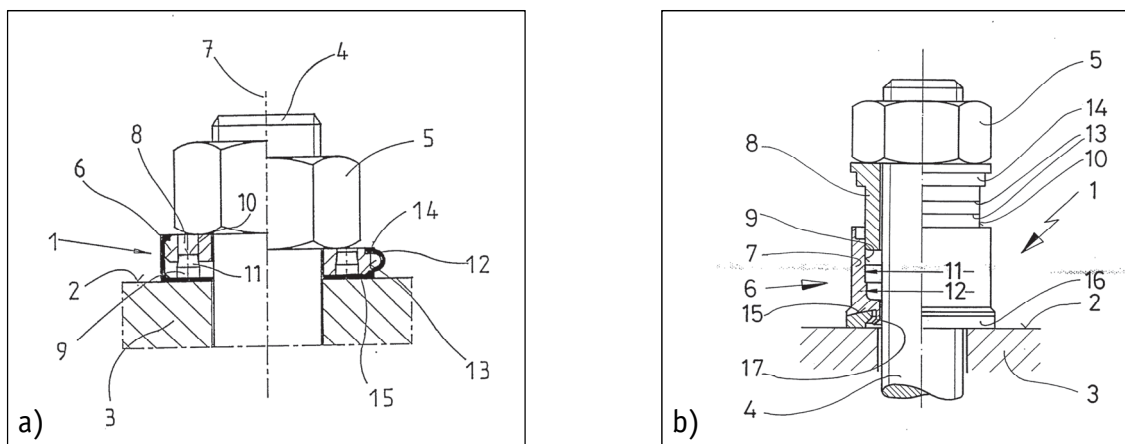
In Deutschland werden direkte Kraftanzeiger nach dem Prinzip der originalen *Pre-Load Indicating Washer* [Tu62] im Stahlbau nicht verwendet. Sie waren und sind weitestgehend unbekannt. Nach der aufkommenden Verbreitung in Nordamerika ist in der Zeitschrift STAHLBAU [Sc76] über das Verfahren kurz berichtet worden; offenbar ohne eine Verbreitung zu initiieren.

Das mechanische Prinzip des direkten Kraftanzeigers, mit Hilfe von Verformungen eine ursächliche Kraft beurteilen zu können, ist allerdings nicht unbekannt. Die folgenden Patentanmeldungen, siehe Bilder 3.3 bis 3.5, geben einen Überblick. Weitere Details sind den entsprechenden Dokumenten zu entnehmen.



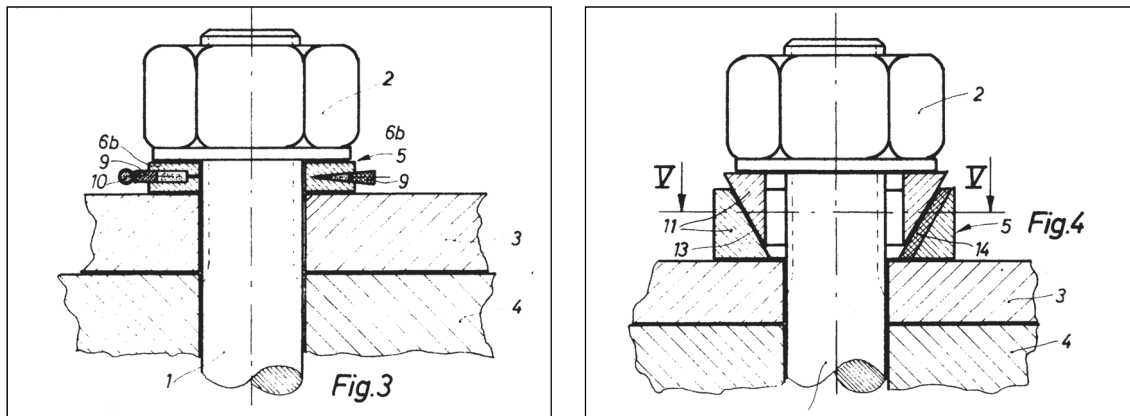
**Bild 3.3.** (a) Vorspannkontrollelement für Schraubanker (DE4421959 A1) [Ha94],  
(b) Lastanzeigende Scheibe (EP2633201 B1) [ADS11]

**Figure 3.3.** (a) Device for controlling the pre-stressing of an anchoring bolt  
(DE4421959 A1) [Ha94],  
(b) Load-indicating washer (EP2633201 B1) [ADS11]



**Bild 3.4.** (a) Zwischenlegscheibe für eine Schraubverbindung (DE4307059 C1) [A093],  
(b) Zwischenlegscheibe für eine Schraubverbindung mit Mitteln zum Anzeigen  
der Anzugskraft einer Schraube (DE4429082 C2) [A094]

**Figure 3.4.** (a) Compressible washer for visual indication of screw-fastener tension  
(DE4307059 C1) [A093],  
(b) Intermediate packing washer for screw connection  
(DE4429082 C2) [A094]



**Bild 3.5.** Anordnung zur Messung und Überprüfung der Spannkraft einer Schraubenverbindung (DE2939096 A1) [MNC79]

**Figure 3.5.** Measuring and monitoring screw connection clamping force - using deforming pressure measurement washer with peripheral ceramic ring (DE2939096 A1) [MNC79]

### 3.2 Besondere kritische Anmerkungen

Die bisher dargestellten und in der Literatur auffindbaren Informationen zu den Eigenschaften – insbesondere den nachteiligen – der direkten Kraftanzeiger betreffen fast ausschließlich den Aufwand der Kontrolle mit der Fühllehre und die mögliche Anfälligkeit für Korrosion.

OWENS & CHEAL [OC89] thematisieren darüber hinaus die mechanischen Prinzipien des direkten Kraftanzeigers, die selbstverständlich nach der Montage unter der Betriebsbeanspruchung im Bauwerk vorhanden bleiben und den dauerhaften Erhalt der Vorspannkraft gefährden können. Sie teilen folgende Bedenken zum Einsatz von direkten Kraftanzeigern mit:

[3. Bolts and bolting, rivets and riveting / 3.3. HSFG bolts / 3.3.6. Proprietary load-indicating devices]:

*„Both the gap changes and the nib shearing are, of course, irreversible and therefore these systems cannot indicate current bolt load. All they can show is that the particular bolt was once tensioned to its proof load or above. They should therefore not be used in situations where there is an interaction between neighbouring bolts.“* [OC89], S. 35.

[5. Static behaviour and design of bolts and bolted connections / 5.6. HSFG bolts under external tension / 5.6.2. Relaxation of preload]:

„A particular problem exists with bolts where load-indicating washers or bolts have been used to monitor bolt tightening. These devices are designed to deform plastically once a certain bolt load has been attained; **a residual gap of up to 0.4 mm will remain after tightening.** The tangential stiffness of such a system will be considerably less than that of a conventional HSFG bolt where plasticity is confined to the bolt. **With a grip length of 100 mm, say, closure of a gap of 0.4 mm will lead to total relaxation of the bolt preload.** If such devices are used for connections which are required to resist slip under shear loading but may also **be subject to external tension loading it is clearly important to take a conservative view of the maximum load that may be applied to each bolt,** with proper account of prying.“ [OC89], S. 73.

[6. Fatigue of connections / 6.3. Fatigue behaviour / 6.3.3. Bolts and bolted joints in tension]:

„Thus, when carrying out a **fatigue-sensitive design** one of the methods given in Section 5.4.3 should be used to determine the magnitude of the prying action, the objective of the design being to ensure that **the sum of the maximum external plus prying forces in the bolts is suitably less than their preload.**

In practice, a very reliable way of ensuring that the bolts are suitably tightened is simply to specify HSFG bolts with the torque control method of tightening. **Load-indicating devices should be used with caution, because any overstress can lead to a significant loss of preload.** Turn-of-nut methods will be avoided.

Bearing in mind that the reduced stress range in the bolts is achieved by prestressing the connection, care must be taken during fabrication and erection to ensure that the reduced stress range in the bolts is not increased by any lack of fit between the plates.“ [OC89], S. 78.

Die Empfehlungen zur Auswahl eines Anziehverfahrens können sicher vor dem Hintergrund des heutigen Wissensstandes und der verfügbaren Verbindungselemente mit ihren definierten Produkteigenschaften differenzierter betrachtet werden. Grundsätzlich ist eine möglichst hohe Vorspannkraft von Vorteil, die in der betrachteten Auswahl allerdings nur mit einem Drehwinkel- bzw. kombinierten Verfahren eingebracht werden kann. Ist eine Verbindung derart konstruiert, bemessen und ausgeführt, dass Inspektion und Instandsetzung erforderlich sind, so ist das Drehmomentverfahren die einzig mögliche Wahl. Neben den formulierten Bedenken sind die direkten Kraftanzeiger auch für diese beiden Anforderungen

nicht geeignet, weder für die kontrollierte Erzeugung einer höchstmöglichen Vorspannkraft, noch für die Kontrolle und ein mögliches Nachziehen.

Spätestens seit dieser Veröffentlichung darf insbesondere in Großbritannien vorausgesetzt werden, dass bekannt ist, dass

- direkte Kraftanzeiger nur die vormalige Montagevorspannkraft und nicht die vorhandene Vorspannkraft anzeigen können,
- eine Verwendung von DTI bei gegenseitiger Beeinflussung benachbarter Schrauben nicht zu empfehlen ist,
- mit dem vorhandenen Potential des Spaltes an plastischer Verformbarkeit ein vollständiger Vorspannkraftverlust möglich ist,
- äußere Zugbeanspruchung sehr konservativ berücksichtigt werden sollte, damit
- die einwirkende Schraubenkraft einschließlich möglicher Abstützkräfte kleiner als die Vorspannkraft bleibt.

**BERENBAK [Be12]** analysiert und bewertet die vier in EN 1090-2 angebotenen Anziehverfahren auf Grundlage der dort sowie in den verknüpften Produktnormen aus der Reihe EN 14399 geregelten Anforderungen an die Grenzwerte und Streuungen der Produkteigenschaften. Der Maßstab ist dabei das zuverlässige Erreichen der Mindestvorspannkraft  $F_{p,C}$ , die unter Berücksichtigung der allgemeinen Forderungen gemäß EN 1990 die 5 %-Fraktile als unteren charakteristischen Wert darstellen soll.

Ebenso wird berücksichtigt, dass die Vorspannkraft beim Anziehen eine Bauteileigenschaft darstellt, für die die Einhaltung des oberen charakteristischen Wertes als 95 %-Fraktile gegen Versagen zu fordern ist, in diesem Fall die erreichbare Schraubenkraft unter gleichzeitiger Torsionsbeanspruchung.

Für die Anwendung des Verfahrens mit direkten Kraftanzeigern wird wie folgt angemerkt:

*„Attention has to be paid to the corrosion protection of the remaining gaps between the washers to prevent splice or stress corrosion.*

***Overall the DTI method is very sensitive for accidental overloading on tension. The remained gaps may be closed pressing the protrusions flat. As they shall***

*not spring back, the preload shall be reduced after such an overload. The same loss of preload may happen when the connection is pressed together by an increasing number of tightened bolts during the second step“ [Be12], S. 6.*

Der Mechanismus eines Vorspannkraftverlustes durch nachträgliches Verformen der Überstände ist kritisch angemerkt. Ob nur eine außergewöhnliche Überbeanspruchung einen solchen Vorspannkraftverlust verursachen mag, bleibt zu klären.

Die gegenseitige Beeinflussung benachbarter Schrauben beim Anziehen kann grundsätzlich zu Vorspannkraftverlusten führen. Dies gilt im Übrigen für alle Anziehverfahren. Allerdings resultiert in diesem Fall der Vorspannkraftverlust einer einzelnen Schraube aus dem in der Regel elastischen Zusammendrücken der Bauteile, so dass sich die betrachtete Schraube entspannt. Wird das Rückfedern der Bauteile wieder zugelassen, z.B. durch Lösen benachbarter Schrauben, so ist die Vorspannkraft – präziser: die Schraubenkraft – wiederhergestellt. In diesem Fall wird die Schraubenkraft nicht in die Trennfuge der Bauteile als erforderliche Flächenpressung eingeleitet, sondern in eine unbestimmte Zwängungsbeanspruchung der Bauteile umgesetzt, zumeist als Biegung. Sofern die Klemmkraft nicht der Schraubenkraft entspricht, ist die „Vorspannkraft“ in der Regel unwirksam.

Darüber hinaus wird kritisch angemerkt:

„2.6.4 *The reached preload on the DTI bolt assembly **depends on the correct measuring with a precision of tenths of millimeters** using feelers by construction workers on site. Maybe they may not reach the same accuracy as the production controllers.*

2.6.5 *No flattening data are available to measure the pressing to reach the first step*

*To reach a firm packed connection to avoid loss of preload during the second step during the progress of the tightening **is difficult to reach** because of the indirect and accurate way of controlling the flattening of the protrusions. In the second step only 10% of the bolt assemblies shall be fully pressed.*

*The preload once reached by the DTI method may be controlled by checking the individual bolt assemblies again by measuring the remaining gaps between the washers.*

*The bolt assemblies are sensitive for accidental overload pressing the protrusions flat. This may result in loss of preload as they do not spring back.*



*For the second step of the DTI method each type of wrench may be used.“*

[Be12], S. 6.

„NOTE 2: *After the final preloading a small gap remains between the DTI washer and the contra surface, which may be sensitive for splice corrosion and may give access for possible stress corrosion in the preloaded thread of the bolt, when the bolt material is sensitive for this reaction“*

[Be12], S. 6.

Über die Möglichkeiten, vom ersten zum zweiten Anziehschritt zu gelangen, ohne eine automatische Begrenzung seitens des Anziehgerätes zur Verfügung zu haben, sondern nur manuell die Fühllehren einsetzen zu können, wird folgende Überlegung angestellt:

„*The criterion for the realization of the tightening by the DTI method in EN 1090-2 is based on the deformation of the protrusions as an indication for the reached pre-load on the bolts. As the total width of this gap for a M20 - 10.9 bolt is about 1.5 mm, the deformation should be measured in tenths of mm. As the end cap [sic] should be  $\leq 0,25$  mm, the total flattening has to be between 1,25 and 1,5 mm. With a pitch of 2,5 mm for an M20 bolt the total needed rotation should be between  $180^\circ$  and  $216^\circ$ , a final target range of  $36^\circ$ .“* [Be12], S. 17.

„NOTE:

*The protrusion in a DTI washer for a M20 bolt is about 1,5 mm. The pitch of a M20 bolt is 2,5 mm.*

*The remaining gap after tightening should be  $\leq 0,25$  mm, but not closed.*

*So the total rotation to flatten the protrusions should be a bit more than 1,25 mm or  $180^\circ$ .*

*Maybe  $120^\circ$  in step one (plus the compression of the connection) and  $60^\circ$  left for step 2.*

*The final target range maybe the 0,25 mm left or just  $36^\circ$  degrees.*

*So the target average may be  $20^\circ$  with a spread of  $\pm 15^\circ$ . Needs precision.“*

[Be12], S. 17.

Der erste Anziehschritt wird wie folgt beschrieben und kommentiert:

„***The first step of this method it is essential to close the steel plate package fully.***  
*Otherwise, the first final tightened bolts in step 2 are prone to being unloaded by a*

further compression of the package during the final tightening of subsequent bolt assemblies.

*This point may not easily be reached during execution because of the small dimensions of these protrusions. **No preload force for the first step is determined by the EN 1090-2 code and there is no demanded flattening/preload curve available in the EN 14399-9.** The firm closure of the plates in the connection shall be reached by a go around flattening of the DTI washers, measuring the remained gaps to remain sufficient above the end gaps, to remain capacity for the second step.*

***This needs concentration and workmanship.***“ [Be12], S. 18.

Für den zweiten Schritt wird neben der Darstellung der Vorgehensweise zur Bestimmung und Bewertung des Spaltes folgendes hinsichtlich des zuverlässigen Erreichens der Mindestvorspannkraft ausgeführt:

*„According to EN 14399-10 [sic], the DTI washers shall be calibrated during production on **preload values between  $0,7 f_{ub}A_s$  and  $0,84 f_{ub}A_s$ , with  $0,77 f_{ub}A_s$  as average.** These values are reached when the gap between the washers is reduced to the values given in Table J.1 of EN 1090-2. The production tests exists of 8 samples, each with a positive result. **They produce a reliability over 95% with this production tests.***

*It should be recognized that these results are reached by well skilled and well trained operators under laboratories circumstances. In practice the bolt assemblies should be installed by construction workers on site under all whether [sic] circumstances, with the task to measure on tenths of millimeters.“* [Be12], S. 18.

„NOTE:

*After the final preloading a small final gap remains between the DTI washer and the contra surface, **which may be sensitive for splice corrosion and may give access for possible stress corrosion in the preloaded thread of the bolt**, when the bolt material is sensitive for this reaction.“* [Be12], S. 18.

Es handelt sich sicher bei der Benennung von EN 14399-10 um einen Schreibfehler. Es muss Teil 9 gemeint sein. Für direkte Kraftanzeiger ist die zulässige Streubreite der Vorspannkraft bei Erreichen eines Spaltes von 0,4 mm wie angegeben einzuhalten, vgl. Tabelle 2.2. Tatsächlich ist allerdings für den Mittelwert der erzielten Kräfte keine Anforderung gestellt. Das dargestellte Kriterium  $1,1 F_{p,c}$  entstammt ausschließlich EN 14399-10 und gilt für HRC-Garnituren.

Nichtdestotrotz wäre es eine sinnvolle – wenn nicht sogar zwingend erforderliche – Maßnahme, ein solches Kriterium einzuführen. Nach den bestehenden Regeln ist es ausreichend, dass alle acht Prüfergebnisse die Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  gerade eben erreichen. Und dies sind – wie hier beschrieben – wohlgemerkt die Drucklastversuche, die ohne den realen Einfluss der Schraubengarnitur mit dem Drehen einer Komponente durchgeführt werden.

Die weitaus wichtigere Prüfung, um die Gebrauchseignung zum Erreichen der Mindestvorspannkraft unter Verwendung des Fühllehren-Kriteriums zu überprüfen, ist der Anziehversuch. Hierfür ist allerdings keine Obergrenze für die erzielte Vorspannkraft geregelt. Da nicht zu erwarten ist, dass ein direkter Kraftanzeiger im Vergleich zum bestandenen Drucklastversuch ( $F_{p,c} \leq F_{0,4} \leq 1,2 F_{p,c}$ ) im Anziehversuch bei identischem Spalt eine größere Druckkraft zulässt bzw. erfordert, kann hier von einer Obergrenze abgesehen werden.

Ob die Ergebnisse von acht Drucklastversuchen ohne das irrtümlicherweise herangezogene Kriterium für die Mindestanforderung an den Mittelwert („with  $0,77 f_{ub} A_s$  as average“ [Be12]) weiterhin die Einhaltung der genannten 95%-Fraktile – eigentlich 5%-Fraktile – gewährleisten können, muss überprüft werden.

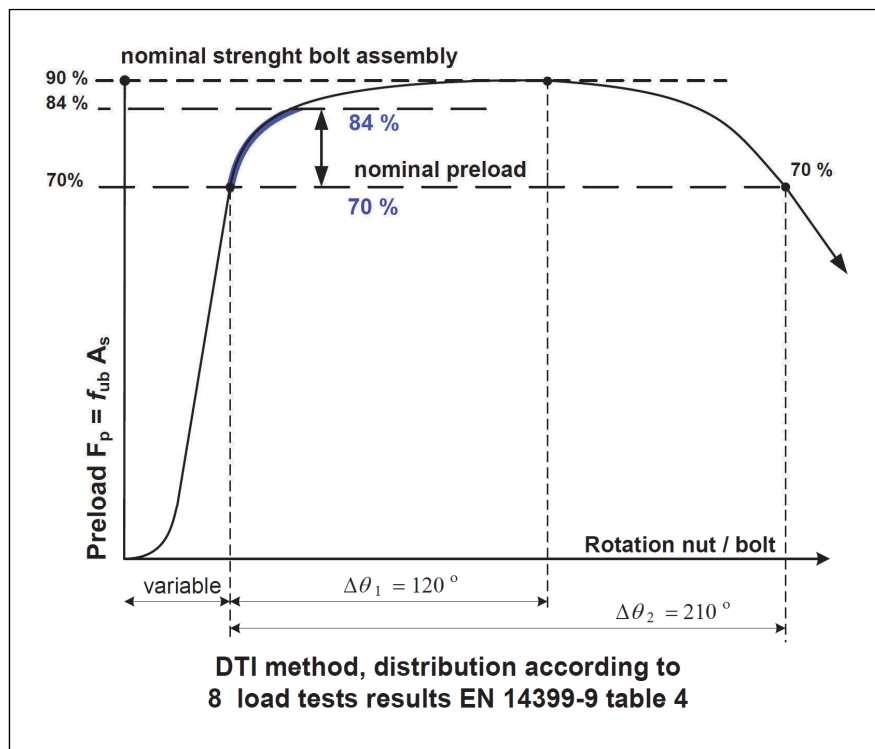
Bild 3.6 [Be12] illustriert die von BERENBAK dargelegten Annahmen und Überlegungen. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Annahmen und Anforderungen für den Drucklastversuch nicht ohne weiteres auf den Anziehversuch bzw. das Verhalten unter realen Montagebedingungen übertragen werden sollten.

Die Ausführungen von BERENBAK [Be12] beinhalten ähnliche Bedenken gegenüber dem Verfahren mit direkten Kraftanzeigern, wie sie bereits von OWENS & CHEAL [OC89] geäußert wurden. Neben den bereits durch Regelwerke begegneten Bedenken gegenüber Korrosion und übermäßigem Anziehen gefährden darüber hinaus

- mögliche gegenseitige Beeinflussungen von benachbarten Schrauben und
- mögliche außergewöhnliche Zugbeanspruchungen

die Einbringung und Erhaltung der erforderlichen Vorspannkraft.

Ob und in welchem Maße diese Bedenken begründet sind, sollen der Blick in die bestehenden Untersuchungen zu direkten Kraftanzeigern zeigen sowie die durchgeführten experimentellen Untersuchungen belegen.



**Bild 3.6.** Streuung der Vorspannkraft für das Verfahren mit direkten Kraftanzeigern nach EN 14399-9 [Be12]

**Figure 3.6.** Variation of preload for tightening with the DTI method according to EN 14399-9 [Be12]

### 3.3 Bestehende Untersuchungen – Literaturschau

#### 3.3.1 Allgemeines

Vorab ist anzumerken, dass eine große Anzahl von veröffentlichten Untersuchungen zu direkten Kraftanzeigern in den USA durchgeführt wurde, so dass im Wesentlichen die Verwendung mit Schrauben „A325“ und „A490“ Bestandteil war. Es handelt sich dabei sinngemäß um die Unterscheidung zwischen den Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9, wobei auch hier analog zu BS 4395-1 gilt, dass die Festigkeit für Schrauben „A325“ bei größeren Durchmessern über 1,0" (analog M24) reduziert ist.

Die Bezeichnungen leiten sich aus den Nummern der zugrunde liegenden Normen für die Eigenschaften von Schrauben für den Metallbau (*structural bolts*) ab. Diese umfassen u. a. die chemischen und mechanischen Eigenschaften. Folgende Normen sind heute verfügbar:

- ASTM A325 – 14  
*Standard Specification for Structural Bolts, Steel, Heat Treated, 120/105 ksi Minimum Tensile Strength,*
- ASTM A490 – 14a  
*Standard Specification for Structural Bolts, Alloy Steel, Heat Treated, 150 ksi Minimum Tensile Strength,*
- ASTM A325M – 14  
*Standard Specification for Structural Bolts, Steel, Heat Treated 830 MPa Minimum Tensile Strength (Metric),*
- ASTM A490M – 14a  
*Standard Specification for High-Strength Steel Bolts, Classes 10.9 and 10.9.3, for Structural Steel Joints (Metric).*

Die erforderlichen Prüfungen werden in ASTM F606/F606M beschrieben, siehe Kapitel 3.5.3.3.

Die Abmessungen der Schrauben A325 und A490 sind hingegen nicht in den namensgebenden Normen geregelt. Es wird stattdessen auf ASME B18.2.6/B18.2.6M verwiesen, siehe ebenso Kapitel 3.5.3.3. Dort sind die in der Garnitur zu verwendenden Muttern, Scheiben und direkten Kraftanzeiger ebenso beschrieben.

### 3.3.2 Unabhängige Untersuchungen

**STRUİK, OYELEDUN & FISHER (1973):**

#### ***Bolt Tension Control with a Direct Tension Indicator [SOF73]***

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden Schrauben A325 und A490 vorgespannt, um das Last-Verformung-Verhalten der direkten Kraftanzeiger ("Coronet" Load Indicator) bei der Montage zu bestimmen. Dabei wurden sowohl parallele als auch nicht parallele Auflageflächen (beidseitig je 5 % Neigung) berücksichtigt. Der direkte Kraftanzeiger war unter dem Schraubenkopf angeordnet, die Mutter wurde gedreht (*Shr.fix*). Die Messung der Schraubenkraft erfolgte mit hydraulischen Messeinrichtungen (*hydraulic bolt calibrators*) oder über die Messung der Längenänderung der Schraube mit einer Messuhr. Das Anziehen erfolgte mit einem pneumatischen Schlagschrauber. Der Spalt zwischen den Überständen wurde mit Fühllehren ausgemessen. Angaben über die Dicke und

Abstufung der verwendeten Fühllehren sowie über die Bestimmung der Höhe des gemittelten Spaltes sind nicht gegeben.

Die Vorspannkraft wurde bei einem Spalt von 0,015" (0,38 mm), der für das Erreichen der Mindestvorspannkraft vom Hersteller vorgegeben war, bestimmt. Das Erreichen der Mindestvorspannkraft konnte beim festgelegten Spalt für parallele Auflageflächen bestätigt werden.

Für nicht parallele Oberflächen gestaltete sich die Messung des Spaltes schwieriger. Man beschränkte sich darauf, das Anziehen soweit fortzusetzen, bis der Spalt an einer Seite vollständig geschlossen war. Die Streuung der Vorspannkraft war dadurch wesentlich größer. Die Mindestvorspannkraft war teilweise nicht erreicht.

Die Darstellung der durchgeführten Untersuchungen wird mit dem Hinweis abgeschlossen, dass das komplette Schließen aller Spalte vermieden werden sollte:

*„Care should be taken to avoid complete closure of the gap at all points around the washer. This will prevent the possibility of over-tightening the bolt to an extent causing damage; it will also prevent satisfactory inspection of the bolt, since it is not possible to determine what bolt tension exists in the closure condition.“* [SOF73]

#### **SURTEES & IBRAHIM (1982):**

##### ***Load Indicating Washers* [SI82]**

Die vorliegende Untersuchung thematisiert ausschließlich einen möglichen Vorspannkraftverlust in Verbindungen mit direktem Kraftanzeiger, die unter Zugbeanspruchung in symmetrischen T-Stummel-Verbindungen belastet wurden. Scherbeanspruchungen wurden nicht berücksichtigt. Der dreiseitige Beitrag ist in Ergänzung zu den folgenden Erläuterungen vollständig in Anhang F enthalten, da einige der dortigen Beschreibungen widersprüchlich bzw. schwer nachvollziehbar sind.

Da es sich hierbei um den einzigen auffindbaren Beitrag handelt, der über experimentelle Untersuchungen an zugbeanspruchten Verbindungen mit direkten Kraftanzeigern berichtet, wird er in diesem Kapitel „*Unabhängige Untersuchungen*“ ausführlicher dargestellt und kommentiert. Wie nachfolgend dargelegt, ist eine tendenzielle Richtung der Bewertungen und Erklärungen zu erkennen. Ob dies an mangelnder Sorgfalt seitens der Autoren oder einer Einflussnahme seitens der Sponsoren liegt, lässt sich nicht belegen.

Die heutige Bereitstellung dieses Beitrags durch einen Hersteller von direkten Kraftanzeigern ließe zudem die ausschließliche Erwähnung des Beitrags in Kapitel 3.3.3 zu. Eine Suche nach diesem Beitrag in wissenschaftlichen Datenbanken hat schließlich nicht zu einem Auffinden geführt. Möglicherweise ist der Beitrag im Anzeigenteil der genannten Zeitschrift CIVIL ENGINEERING erschienen, und somit nicht wie ein referenzierter wissenschaftlicher Artikel auffindbar.

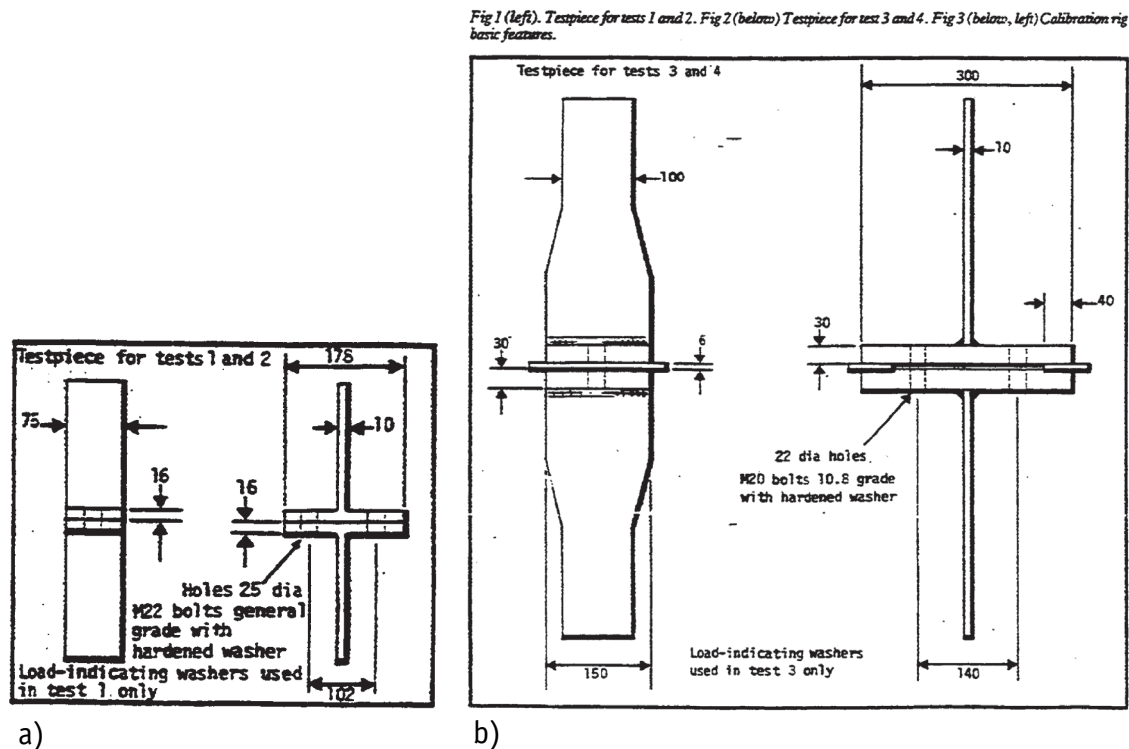
Zur Einleitung in den Beitrag wird die Problemstellung wie folgt dargelegt:

*„In normal use, load-indicating bolts and washers do not contribute significantly to bolt relaxation but occasional doubts have been expressed about their performance in applications where **modest levels of external tension** are to be transmitted. It is argued that such loading **induces a further permanent compression** into the indicating washer (or indicating head) which, on removal of load, contributes to bolt relaxation and lowering of shear resistance. There is no experimental or practical evidence for such a hypothesis, although in some cases of prying action (usually involving misalignment of the faying surfaces) increased bolt relaxation is known to occur whether indicators are used or not. However, the question is whether **the relaxation in such cases is increased or decreased by the presence of an indicator device.**“* [SI82]

Es stellt sich zunächst die Frage, welche Anwendung für direkte Kraftanzeiger die „normale“ ist. Ohne in diesem Beitrag weitere Informationen darüber zu erhalten, drängt sich die Vermutung auf, dass eine Zugbeanspruchung in Richtung der Schraubenachse nicht darunter gezählt wurde, zumal in den experimentellen Untersuchungen Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 (auch mit 10.8 bezeichnet) verwendet wurden, die nach BS 4604-2 nicht auf Zug beansprucht werden dürfen.

Der Mechanismus, unter dem womöglich Vorspannkraftverluste entstehen, ist dargelegt. Zugleich wird in Erwägung gezogen, ob direkte Kraftanzeiger den Verlust der Vorspannkraft, falls er nicht grundsätzlich zu verhindern ist, denn wenigstens verringern können.

Es wurden vier Prüfkörper in Form einer symmetrischen T-Stummel-Verbindung mit einer Schraube je Schenkel, entsprechend zwei Schrauben je Prüfkörper untersucht, siehe Bild 3.7. Davon waren zwei mit direkten Kraftanzeigern vorgespannt, zwei jeweils ohne DTI, und zwar auf die Mindestvorspannkraft der Schrauben mit Hilfe eines kalibrierten Verfahrens (*head strain method*), das nicht näher erläutert ist.



**Bild 3.7.** Prüfkörper mit geringer (a) und hoher (b) Steifigkeit [SI82]

**Figure 3.7.** Test specimen with small (a) and high (b) stiffness [SI82]

Zwei Prüfkörper (Nr. 1 und 2) wurden mit Schrauben M22 – *General grade* so ausgelegt, dass relativ dünne Bleche (16 mm je Schenkel) im Klemmpaket zu Verformungen aus Abstützkräften beitragen sollen, siehe Bild 3.7 (a). Die Auflageflächen wurden eben hergestellt, so dass vollflächiger Kontakt in der Trennfuge gewährleistet war. Die beiden weiteren Prüfkörper (Nr. 3 und 4) wurden mit dickeren Blechen (30 mm je Schenkel) hergestellt. Die Verbindung erfolgte mit Schrauben M20 – 10.9 (*Higher grade*), die allerdings keine Klemmkraft zentrisch um das Schraubenloch herum in der Trennfuge erzeugen konnten. Dafür sorgten Futterbleche von 6 mm Dicke, die an den äußeren Kanten der Flansche in der Trennfuge zwischengelegt wurden, siehe Bild 3.7 (b).

Somit waren zwei unterschiedliche Situationen geschaffen, die Abstützkräfte in unterschiedlicher Ausprägung und Wirkung erzeugen. Eine dritte Ausführungsvariante analog zu Nr. 3 und 4, allerdings ohne Futterbleche und mit vollflächig geschlossener Trennfuge, wäre eine sinnvolle Ergänzung gewesen.

Die äußere Zugbeanspruchung wurde in einzelnen, ansteigenden Lastschritten aufgebracht. Nach einer Haltezeit erfolgte zunächst die Entlastung, an die der nächste Lastschritt anschloss. Der Ablauf der Versuche ist in den Bildern 3.8 und 3.9 dargestellt. Es ist jeweils die relative Änderung der Schraubenkraft – ausge-



hend vom Niveau der Montagevorspannkraft – über der einwirkenden Zugkraft – bezogen auf die Prüfkraft bzw. Mindestvorspannkraft – aufgetragen. Es ist keine Information verfügbar, wie groß die individuelle Montagevorspannkraft jeweils war. Durch die fokussierte Skalierung der Diagramme ist zudem kein Bezug zu einer nicht vorgespannten Verbindung ohne Wirkung von Abstützkräften möglich, für die die einwirkende Zugkraft mit den beiden Schraubenkräften im Gleichgewicht steht.

Entsprechend Bild 3.8 (a) wurde offensichtlich die gesamte einwirkende Zugkraft (160 % der Mindestvorspannkraft) als Referenz verwendet, für die weiteren Diagramme jeweils nur die Hälfte der Zugkraft (80 %), die auf eine Schraube entfällt. Die Beanspruchung wurde somit je Schraube auf die 0,8-fache Mindestvorspannkraft final gesteigert. Die damals gültigen Regelwerke BS 4604 sahen eine maximale Zugbeanspruchung der 0,6-fachen Mindestvorspannkraft vor, vgl. Kapitel 3.5.2.3.

Zu den Prüfungen Nr. 1 (mit DTI) und 2 (ohne DTI) wird festgestellt, dass keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der Vorspannkraftverluste vorhanden wären. Die Darstellung entsprechend Bild 3.8 (a) ist nicht gekennzeichnet, ob hier die Prüfung mit oder ohne DTI erfolgte. Sie zeigt allerdings, dass die Vorspannkraft als Klemmkraft in der Trennfuge wirksam ist und somit die äußere Belastung zunächst nur zu geringen Schraubenzusatzkräften führte.

Es lässt sich allerdings – eher beiläufig – aus den Erläuterungen entnehmen, dass die Prüfungen ohne DTI jeweils ohne eine entsprechende gehärtete Scheibe unter dem Schraubenkopf durchgeführt wurden. Es erscheint daher plausibel, dass die Vorspannkraftverluste ohne DTI – und ohne Scheibe – ebenso zu plastischen Verformungen geführt haben, nicht an den Überständen, aber am Lochrand infolge hoher Flächenpressungen. Im Übrigen gibt es keine Angaben zum Werkstoff der verspannten Bauteile.

Das Prüfergebnis wird folgendermaßen dargestellt:

*„In tests 1 and 2, there was no significant difference in performance with or without load indicating washer. The change in bolt tension, following application and removal of a given level of external load, was marginally less when load indicators were used. At an **external load per bolt of 60 per cent proof load** (the maximum permitted by BS 4604 part 1 for general grade bolts) the change was less than 1 per*

*cent of initial preload. At 160 per cent proof load the change was still below 10 per cent of preload.” [SI82]*

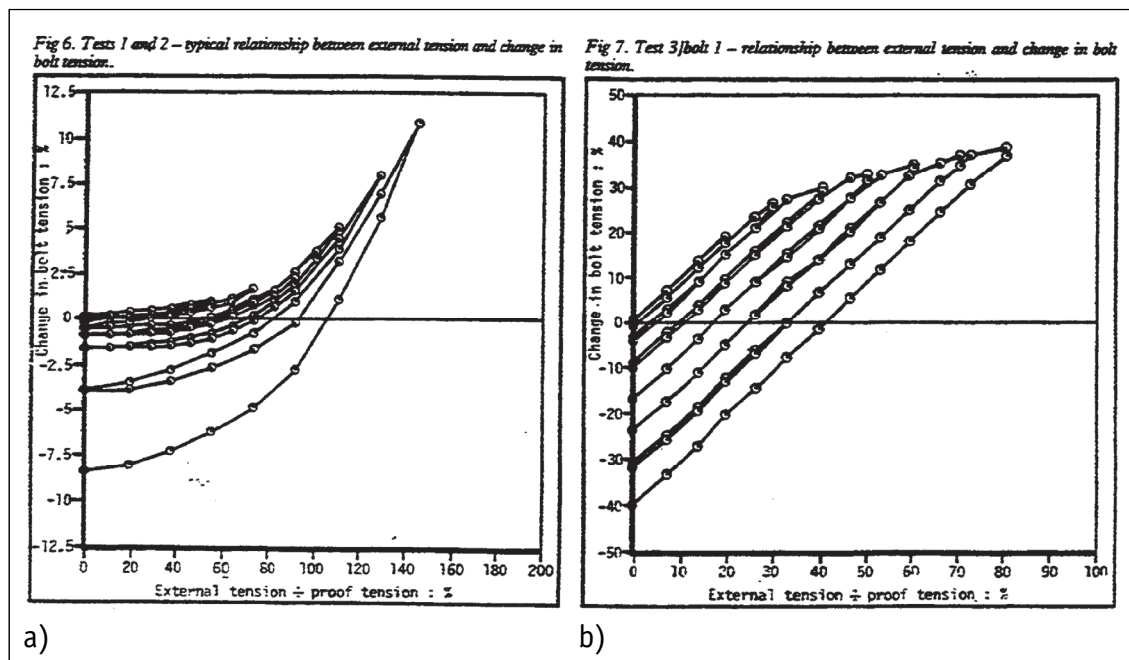
Es sei anzumerken, dass die Art der Formulierung – bewusst oder unbewusst gewählt – vom tatsächlichen Messergebnis ablenkt. Ein Vorspannkraftverlust von 10 % war bei der 1,6-fachen Prüfkraft für zwei Schrauben erzielt worden. Etwa 10 % Vorspannkraftverlust entstanden entsprechend bei einer Steigerung der Zugbeanspruchung von der 0,6- auf die 0,8-fache Prüfkraft je Schraube.

Die Ergebnisse der Prüfungen Nr. 3 und 4 werden wie folgt erläutert und kommentiert, wobei letztendlich unklar ist, welche Prüfung mit, und welche ohne DTI durchgeführt wurde. Die zahlenmäßige Häufigkeit der Bezifferung sowie die Systematik aus den beiden ersten Prüfungen lassen vermuten, dass Prüfung Nr. 3 mit DTI und Nr. 4 ohne DTI durchgeführt wurde.

*„The difference between performance with and without load indicators was quite pronounced, also. The average loss of preload in two bolts after application and removal of an external load per bolt of 80 per cent load was 29 per cent when load indicators were used and 39 per cent when they were omitted.” [SI82]*

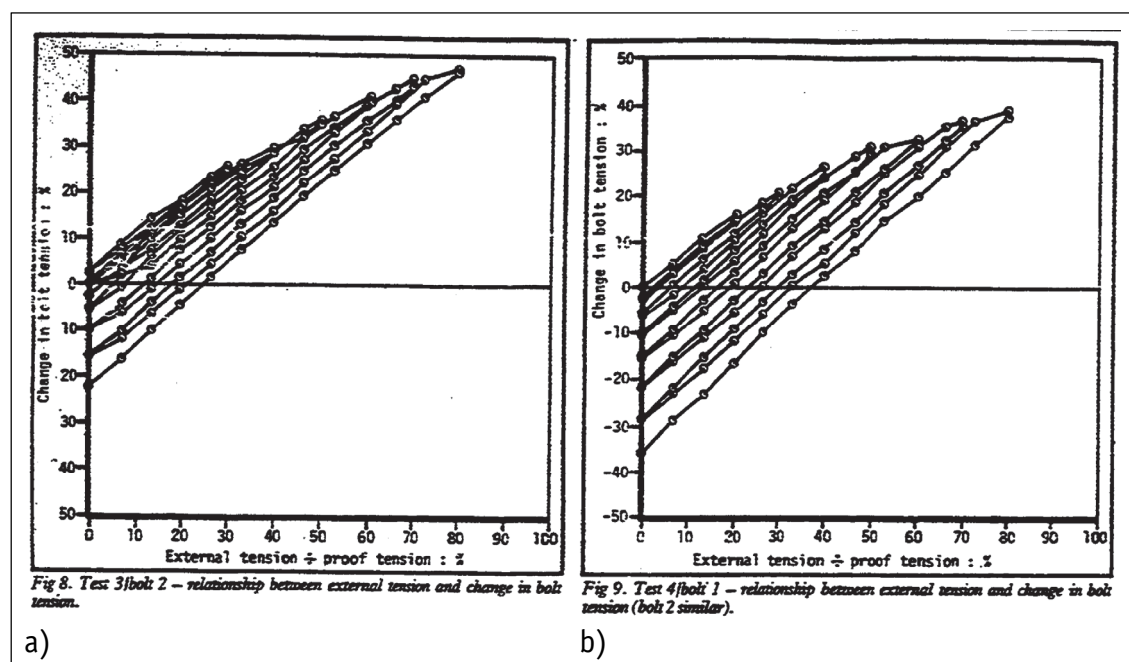
Für die beiden unterschiedlichen Kurvenverläufe der Schrauben von Prüfkörper Nr. 3 (mit DTI), siehe Bilder 3.8 (b) und 3.9 (a), wird folgende Erklärung gefunden:

*„In test 3, the tension in the two bolts differed increasingly as the test progressed, however, the individual loss of preload at any stage was always less than the corresponding loss in test 4. **Although a careful tightening procedure was used in test 3, there was evidence that one side of the joint had closed fractionally more than the other.** Careful attention was paid to tightening procedure in test 4 and in this case symmetrical closure was observed. Almost identical tensions were observed in the two bolts throughout the test. **While the above phenomenon may be attributable in part to variation in bolt or plate properties,** it is perhaps significant that in tests 1 and 2, where tightening procedure was of much less importance **because of good fit between the plates,** the relationship between external load and bolt tension was fairly consistent for all four bolts.” [SI82]*



**Bild 3.8.** Betriebskraft-Schraubenkraft-Diagramme, Prüfungen Nr. 1 und 2 (a) sowie Nr. 3 (Schraube 1) (b) [SI82]

**Figure 3.8.** Working load-bolt load-diagrams, tests No. 1 and 2 (a) as well as No. 3 (bolt 1) (b) [SI82]



**Bild 3.9.** Betriebskraft-Schraubenkraft-Diagramme, Prüfungen Nr. 3 (Schraube 2) (a) und Nr. 4 (Schraube 1) (b) [SI82]

**Figure 3.9.** Working load-bolt load-diagrams, tests No. 3 (bolt 2) and No. 4 (bolt 1) (b) [SI82]

Es ist sehr bemerkenswert, welche Erklärungen für die divergierenden Schraubenkräfte in Prüfung Nr. 3 gefunden bzw. nicht gefunden werden. In diesem Fall handelt es sich um ein „Lehrbuch-Beispiel“ für die gegenseitige Beeinflussung der Vorspannkräfte von benachbarten Schrauben beim Anziehen, siehe Bild 3.7 (b). Es zeigt sich, dass das Verfahren mit direkten Kraftanzeigern in höchstem Maße von vollflächig zusammengefügt Trennfugen abhängt, so dass die Vorspannkraft beim Anziehen benachbarter Schrauben nicht beeinflusst wird.

Es wird nicht erläutert, wie das Anziehen erfolgte. Möglicherweise durch die Kontrolle der Vorspannkraft, und nicht über den Einsatz der Fühllehre. Ob die Vorspannkräfte bei Beginn der Zugbeanspruchung gleich groß waren, lässt sich nicht überprüfen.

Schlussendlich diese Situation mit dem Vorspannen der Schrauben in Prüfung Nr. 4 zu vergleichen und die Ursachen bei den Schrauben und Bauteilen zu suchen, missachtet vollends den naheliegenden Einfluss der direkten Kraftanzeiger und deren Anziehverhalten. Selbstverständlich sorgt die flächige Anlage ebener Bauteile für eine einheitliche Verteilung der Vorspannkräfte und somit auch für entsprechend einheitliche Schraubenkräfte unter Beanspruchung. Und dass dies durch Anziehverfahren, die nicht empfindlich gegenüber dem übermäßigen Anziehen im ersten Anziehschritt sind, sehr viel besser zu erreichen ist, dürfte nun nochmals nachgewiesen sein.

Die Erläuterungen in den Unterpunkten (i) bis (iii) im vorletzten Absatz des Beitrags werden hier nicht gesondert wiedergegeben. Es wird auf Anhang F verwiesen. Die Erklärungen unter den Punkten (i) und (iii) sind nicht nachvollziehbar und tragen nicht zur Klärung der Problemstellung bei. Unterpunkt (ii) beinhaltet die Feststellung, dass der direkte Kraftanzeiger eine höhere Härte als das Bauteil besitzt und somit plastische Verformungen am Lochrand vermindert. Dies als positiven Einfluss („*beneficial influence*“) des direkten Kraftanzeigers zu präsentieren, zeugt von vertriebstechnischer Geschicklichkeit. Die experimentellen Untersuchungen um eine Variante mit einer normalen gehärteten Scheibe unter dem Schraubenkopf zu erweitern, hätte die Aussagekraft des Beitrags sehr bereichert.

#### „Conclusion

*The results from two exploratory tests suggest that the presence of **a load-indicating washer inhibits, rather than induces, loss of pretension** in a bolt subject to high prying conditions. Although further flattening of the protrusions on the washer (as a result of gross overload) is seen as a source of internal deformation, **it would appear***

*that prying forces are lessened, thereby reducing permanent deformation in the bolt. In other words, deformation of the washer is substituted for deformation of the bolt and plate surface, with little change in the final deflected shape of the flanges. In another sense, the load indicator constitutes an additional hardened washer and by aiding dispersion of contact forces will, in any case, reduce permanent indentation of the plates.“ [SI82]*

Es ist aufgrund der geringen Anzahl an Prüfungen und aufgrund der unvollständigen Darstellung der Prüfungen zu hinterfragen, ob weitreichende Schlussfolgerungen überhaupt abgeleitet werden sollten bzw. dürfen. Zumindest wird der Prüfumfang voran gestellt, bevor die sich *angedeuteten* Ergebnisse formuliert werden. Trotz der offenbarten Schwierigkeiten bzw. unzureichend erklärten Beobachtungen wird der positive – hier aber fragwürdig nachgewiesene – Effekt von direkten Kraftanzeigern betont. Ob nun plastische Verformungen in der vorgespannten Verbindung am direkten Kraftanzeiger, in der Schraube bzw. Mutter oder an den Bauteilen auftreten, ist nicht ausschlaggebend; sie sind in jedem Falle zu vermeiden. Hier scheinen allerdings entsprechende Verformungen als „normal“ betrachtet zu werden.

Hinsichtlich des damaligen Standes der Regelwerke mit einer zulässigen maximalen Zugbeanspruchung in Höhe der 0,6-fachen Prüfkraft (Mindestvorspannkraft) ist in den vorliegenden Untersuchungen allerdings gezeigt worden, dass dieses Beanspruchungsniveau bei flächiger Anlage der Bauteile nicht zu Schraubenkräften geführt hat, die für plastische Verformungen in den Verbindungselementen und Bauteilen – und damit für Vorspannkraftverluste – sorgten.

**SCHMECKPEPER, NIELSEN & GENTRY (1994):**

***Effects of Bolt Over-Tightening on Bolted Connections [SNG94]***

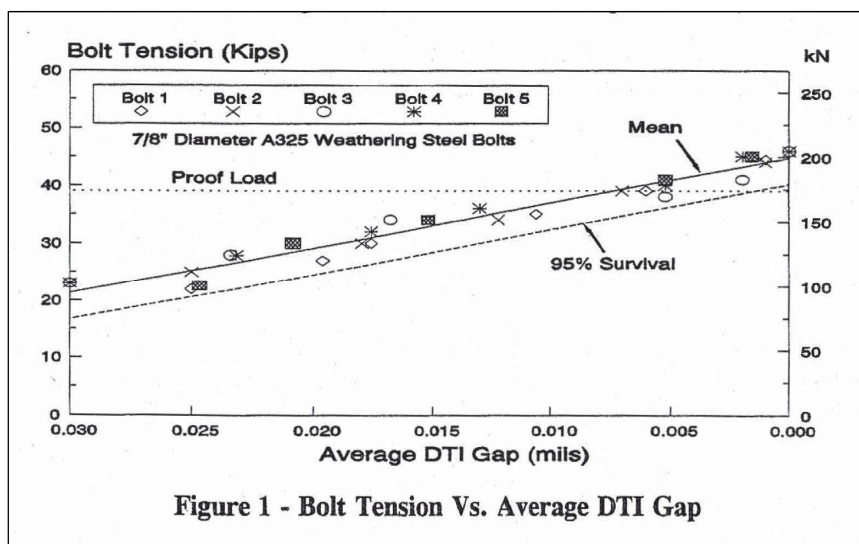
Ausgangspunkt der Untersuchungen waren mittels direkter Kraftanzeiger gleitfest vorgespannte, scherbeanspruchte Schraubenverbindungen, bei denen die Überstände der direkten Kraftanzeiger vollständig zusammengedrückt bzw. die Spalte komplett geschlossen waren. Es war die Frage zu klären, ob die Garnituren ausgetauscht werden müssen.

Dazu wurde ein Versuchsprogramm festgelegt, das unterschiedliche Konfigurationen von Garnituren mit und ohne DTI beinhaltete, die regelkonform oder übermäßig angezogen wurden, sowohl mit direkten Kraftanzeigern als auch mit

dem Drehwinkelverfahren. Der DTI wurde unter dem Schraubenkopf angeordnet, die Mutter gedreht (*Shr.fix*). Im ersten Teil der Untersuchungen wurde das Last-Verformung-Verhalten des DTI mit Hilfe von Fühllehren sowie der Drehwinkel bis zum Bruch der Schraube in einer hydraulischen Messeinrichtung bestimmt. Über die Art und Weise der Messung des Spaltes sind keine Angaben gemacht. In Bild 3.10 ist zu sehen, dass je Laststufe und je Schraube ein Wert für den ermittelten *mittleren Spalt* aufgetragen ist. Wie und in welchem Maße die Mittelung durchgeführt wurde, ist nicht erläutert.

Im zweiten Teil wurden vorgespannte Garnituren auf Abscheren in ein- und zweiseitigen Verbindungen beansprucht, um die vorhandene Abschertragfähigkeit zu bestimmen. Es wurde festgestellt, dass die erreichte Scherkraft die rechnerische Abschertragfähigkeit erreicht und überschritten hat, solange das übermäßige Anziehen nicht bis zu einem signifikanten Abfall der Schraubenkraft nach dem Überschreiten des maximalen Vorspannkraftniveaus führte. Trotzdem wurde abschließend festgehalten, dass das vollständige Schließen der Spalte des DTI nicht zulässig ist und die Garnituren deshalb auszutauschen sind:

„When properly installed and inspected, DTI's may give a reliable indication that the required proof loading has been attained. Nil DTI gap is cause for bolt rejection.“  
[SNG94]



**Bild 3.10.** Spalt-Schraubenkraft-Diagramm [SNG94]

**Figure 3.10.** Bolt Tension Vs. Average DTI Gap [SNG94]

**DAHL, LU, FISHER & ABRUZZO (1996):**

***Comparative Effectiveness of Tightening Techniques for A490 1¼-in. Diameter Bolts* [DLF96], ergänzt durch [SF96] und [DLF97] sowie [DLF91]**

Die vergleichenden experimentellen Untersuchungen beinhalteten folgende Versuchsparameter:

- *Anziehverfahren*: Turn-of-Nut Methode oder DTI Methode,
- *Länge der Schrauben* (Klemmlänge nicht angegeben):  
lange Schrauben (14¼ in. = 11,4 *d*) und kurze Schrauben (5 in. = 4 *d*),
- *Lage der zu verschraubenden Bauteile*: vertikal oder horizontal,
- *Schmierung des Gewindes*: gewachst oder leicht geölt.

Die direkten Kraftanzeiger wurden sowohl direkt unter dem Schraubenkopf (DTI Methode #1) als auch zusammen mit einer gehärteten Scheibe unter der Mutter (DTI Methode #2) angeordnet. Ob die Mutter oder die Schraube zum Anziehen gedreht wurden, ist nicht explizit angegeben. Die Verwendung der gehärteten Scheibe unter der Mutter bzw. deren Entfall unter dem Schraubenkopf deuten allerdings implizit darauf hin, dass jeweils die Mutter gedreht wurde. Somit wurden die beiden Montagekonfigurationen *Shr.fix* (#1) und *Mu.rot* (#2) berücksichtigt.

Für die Montagekonfiguration *Shr.fix* (#1) wurde die Mindestvorspannkraft in der überwiegenden Anzahl der Versuche mit langen und kurzen Schrauben nicht erreicht, siehe Bild 3.11. Es kam dazu eine Fühllehre mit einer Dicke von 0,015" (0,38 mm) zur Anwendung. Mit dem DTI unter der gehärteten Scheibe und gedrehten Mutter (*Mu.rot*, #2) wurde die Mindestvorspannkraft unter Verwendung der Fühllehre mit einer Dicke von 0,005" (0,127 mm) häufiger erreicht bzw. übertroffen. Unterschreitungen der Mindestvorspannkraft wurden allerdings auch in dieser Montagekonfiguration festgestellt, siehe Bild 3.12.

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden von den Autoren wie folgt zusammengefasst:

*„The results of this study, which was limited to 1¼-in. diameter A490 bolts, show the following:*

1. *Turn-of-nut method was the most acceptable installation method for pretensioning short and long bolts with the demonstrated test parameter combinations used in this experimental study.*

2. Direct tension indicator method #1 failed to produce minimum required tensions for both the short and long bolts.
3. Direct tension indicator method #2 was as effective as the turn-of-nut method but not as efficient.
4. The bolt length was by far the most influential factor and its effect is coupled with that of the stiffness of the plate assemblies: The thicker plies used with the long bolts would require more force to bring them into contact compared to the thinner plies of the short bolt assembly. For all methods the final bolt strains indicated that the pretension in the short bolts was significantly higher than that in the long bolts.
5. The condition of the threads, whether waxed or oiled, had a moderate effect on the preload of bolts installed by the turn-of-nut method. This effect was less significant for bolts tightened by the direct tension indicator methods, as would be expected.

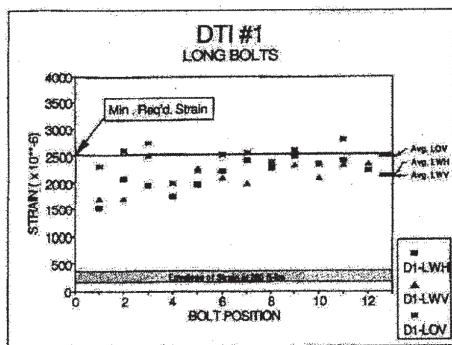


Fig. 14. Direct tension indicator method #1—long bolts.

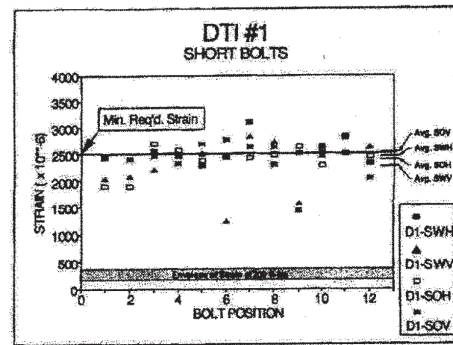


Fig. 16. Direct tension indicator method #1—short bolts.

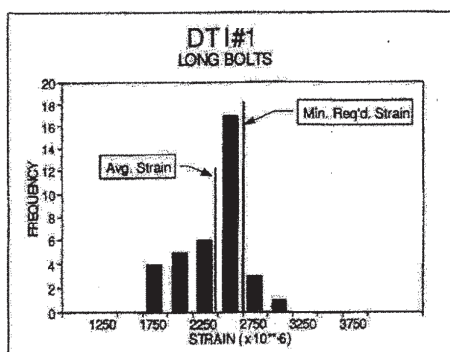


Fig. 15. Frequency diagram for direct tension indicator method #1—long bolts.

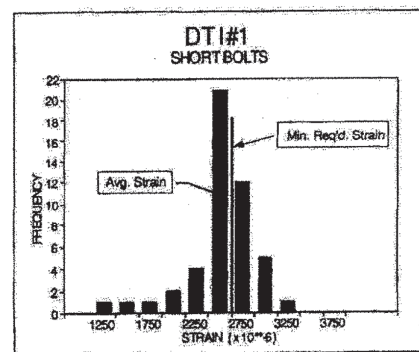


Fig. 17. Frequency diagram for direct tension indicator method #1—short bolts.

**Bild 3.11.** Vorspannen mit direktem Kraftanzeiger unter dem fixierten Schraubenkopf (Shr.fix) [DLF96]

**Figure 3.11.** Tightening with direct tension indicator under the clamped bolt head (Shr.fix) [DLF96]



6. The specified one-third turn resulted in a high elastic strain for the short A490 1¼-in. diameter bolts, ensuring that the installed bolts exceeded the minimum specified preload.
7. The 200 ft-lb snug condition did not bring all the plates into contact when there was a large number of plates. Since all the plates were not in full contact, there was a rise in final strains as the joint was tightened. Higher snug preloads are needed to fit-up heavy steelwork when using large high strength bolts.
8. The time to tighten each bolt is longer than the RCSC Specification of ten seconds, even after using the largest impact wrenches available. The tightening times for direct tension indicator method #1 and #2 were longer than the time of twenty seconds recommended by the manufacturer of the load indicating washers.
9. Both the Cleco W-2119 and the CP-614 wrenches were capable of tightening the A490 1¼-in. bolts when they were in proper working order.“ [DLF96]

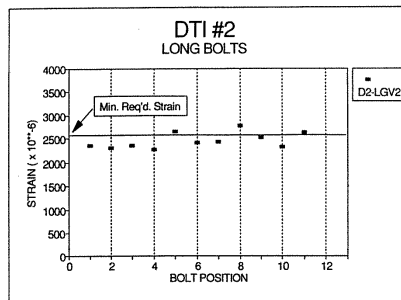


FIGURE 20: DIRECT TENSION INDICATOR METHOD #2... LONG BOLTS

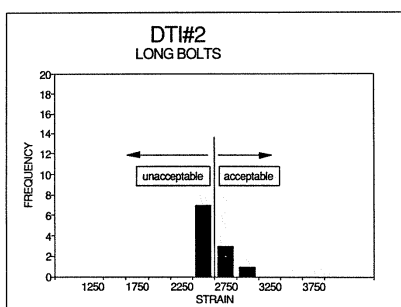


FIGURE 21: FREQUENCY DIAGRAM FOR DIRECT TENSION INDICATOR METHOD #2... LONG BOLTS

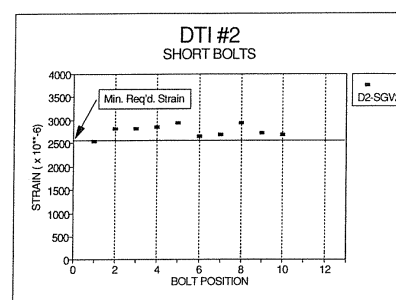


FIGURE 22: DIRECT TENSION INDICATOR METHOD #2... SHORT BOLTS

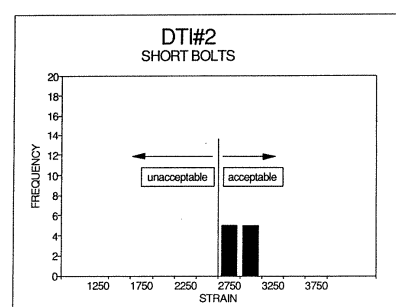


FIGURE 23: FREQUENCY DIAGRAM FOR DIRECT TENSION INDICATOR METHOD #2... SHORT BOLTS

**Bild 3.12.** Vorspannen mit direktem Kraftanzeiger unter der gedrehten Mutter (Mu.rot)  
[DLF91]

**Figure 3.12.** Tightening with direct tension indicator under the rotated nut (Mu.rot)  
[DLF91]

SCHMECKPEPER, NIELSEN & GENTRY (1999):

***The Effects of Over-Compressing ASTM F959 Direct Tension Indicators on A325 Bolts Used in Shear Connections* [SNG99], ergänzt durch [Ri99] und [Sc99]**

Die Untersuchungen aus [SNG94] wurden in größerem Umfang fortgesetzt. Es blieb allerdings ausschließlich bei der Montagekonfiguration A – *Shr.fix* analog zu Bild 2.21 mit den Komponenten entsprechend der amerikanischen Produktnormen. Zur Bestimmung der Höhe des Spaltes wurden wiederum Fühllehren eingesetzt, offenbar in einem Satz unterschiedlicher Abstufung. Genauere Angaben dazu sind nicht enthalten.

In den Untersuchungen konnte keine signifikante Abminderung der Abschertragfähigkeit durch übermäßiges Anziehen der Garnitur festgestellt werden. Dennoch sollte das vollständige Schließen der Spalte nicht zugelassen werden, damit eine Kontrolle möglich ist.

*„To function properly as load indicating devices, DTIs must be installed properly. Both contractor and inspector should review proper installation techniques before each project to ensure that DTIs are being installed and inspected properly.“* [SNG99]

*„The current AASHTO specification requirement of the removal and replacement of overcompressed DTIs is conservative. However, due to inspection constraints, specific modifications to the current installation practices governing the usage of DTIs are not proposed.“* [SNG99]

Vor dem Abschluss der Versuchsreihe wurde eine Überarbeitung von ASTM F959 verabschiedet, die zur Änderung des Prüfverfahrens für direkte Kraftanzeiger führte, siehe Bild 3.13. Die Bestimmung des Spaltes unter der Mindestvorspannkraft war entsprechend ASTM F959-96 nicht mehr mit einer Fühllehre oder Messuhr – analog zu BS 7644-1 – durchzuführen, sondern mit dem zweistufigen Prüfablauf unter Verwendung der direkt ablesbaren Lehre, d.h. einer Messuhr oder eines Wegaufnehmers, wie er heute noch Bestand hat und in EN 14399-9 implementiert ist. Dies bot den Anlass für vergleichende Versuche an direkten Kraftanzeigern, die nach alter und neuer Produktnorm hergestellt waren.

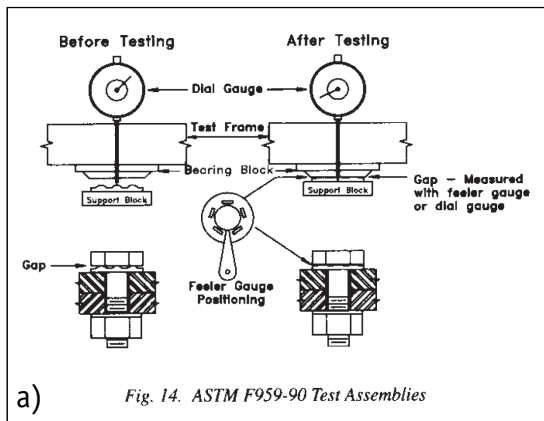


Fig. 14. ASTM F959-90 Test Assemblies

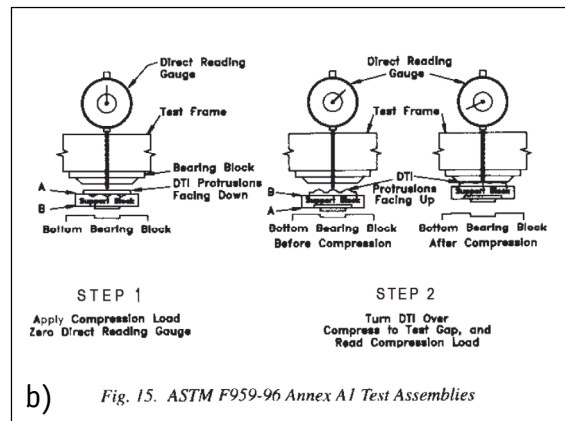


Fig. 15. ASTM F959-96 Annex A1 Test Assemblies

**Bild 3.13.** Drucklastversuch nach ASTM F959-90 (a) und ASTM F959-96 (b) [SNG99]**Figure 3.13.** DTI test according to ASTM F959-90 (a) and ASTM F959-96 (b) [SNG99]

Bedauerlicherweise geht aus den Erläuterungen zu den Drucklastversuchen nicht eindeutig hervor, welcher Prüfablauf mit den „alten“ DTI entsprechend Bild 3.14 (a) durchgeführt wurde und von welchem Hersteller– MFR #1 oder #2 – die DTI dazu stammten. Bei der Anzahl von sechs Prüfkörpern, die in zwei Untergruppen á drei Prüfkörpern mit unterschiedlicher Schraubenlänge aufgeteilt waren, stammt die Auswahl der DTI wahrscheinlich von nur einem Hersteller.

Es ist anzunehmen, dass die Prüfung der „alten“ DTI auch mit dem „alten“ Prüfablauf durchgeführt wurde. Für die vergleichenden Untersuchungen nach Bild 3.14 (b) bis (e) ist die Beschreibung eindeutig; es wurden „neue“ DTI mit dem „neuen“ Prüfablauf bzw. mit der Kalibrierprüfung unter Baustellenbedingungen getestet. Inwieweit die getroffenen Bewertungen die Ursachen der divergierenden Messergebnisse eindeutig erfassen können, bleibt unklar.

Folgendes Ergebnis ist für die zugrunde liegenden Oberflächenausführungen – wie hergestellt (*plain*), verzinkt (*galvanised*) und beschichtet (*epoxy coated*) – nachvollziehbar:

*„DTI gap measurements made using feeler gauges showed more variability than those made using direct reading gauges. In addition, DTI gap measurements made using feeler gauges indicated lower loads than those made using direct reading gauge.“*

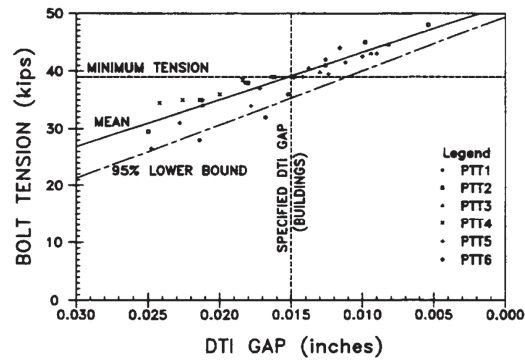


Fig. 5. Bolt Tension vs. DTI Average Gap, 7/8-in. A325 Plain Bolts with Plain DTIs

a)

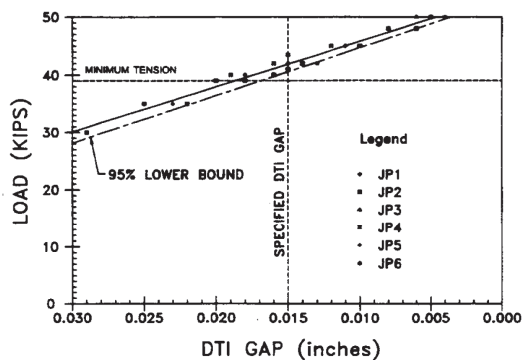


Fig. 16. F959-96 Annex A1—Load vs. DTI Gap, 7/8-in. A325 Plain Bolts with Plain DTIs, MFR #1

b)

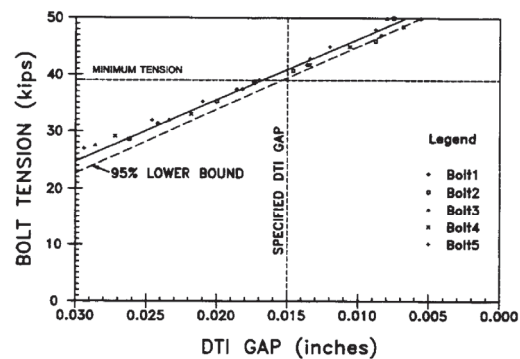


Fig. 22. Bolt Tension vs. Average DTI Gap, Field Measurements, 7/8-in. A325 Plain Bolt with Plain DTIs, MFR #1

c)

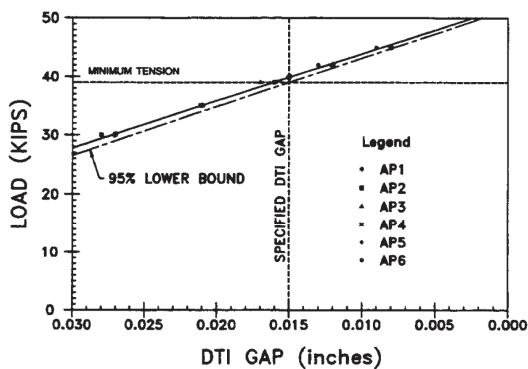


Fig. 17. F959-96 Annex A1—Load vs. DTI Gap, 7/8-in. A325 Plain Bolts with Plain DTIs, MFR #2

d)

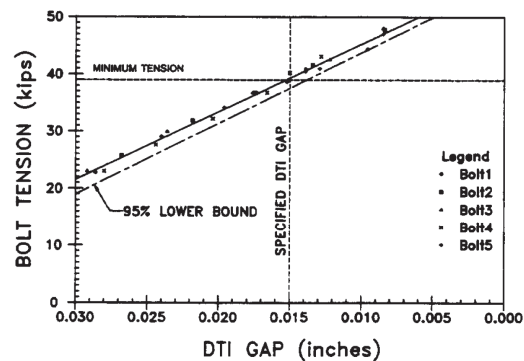


Fig. 23. Bolt Tension vs. Average DTI Gap, Field Measurements, 7/8-in. A325 Plain Bolts with Plain DTIs, MFR #2

e)

**Bild 3.14.** Spalt-Kraft-Diagramme (normal/wie hergestellt) [SNG99]

**Figure 3.14.** Gap-bolt tension/load-diagrams (plain) [SNG99]

CLEARY, RIDDELL & LACKE (2012):

***Effect of Washer Placement on Performance of Direct Tension Indicators with Curved Protrusions [CRL12]***

Die experimentellen Untersuchungen wurden mit besonderem Augenmerk auf die Verwendung von gehärteten Scheiben oder gehärteten Muttern, die im Kontakt mit den Überständen des DTI waren, durchgeführt. Dabei wurden ausschließlich direkte Kraftanzeiger des Herstellers TURNASURE LLC einbezogen. Diese weisen als besonderes Merkmal bogenförmige – anstatt tangential gerade – Überstände auf. Folgende Versuchsparameter wurden einbezogen:

- *Schraubendurchmesser*:  $\frac{3}{4}$ " ,  $\frac{7}{8}$ " und 1" ,
- *Festigkeit bzw. Festigkeitsklasse der Schraube*: ASTM A325 und A490,
- *Verwendung der gehärteten Scheibe*: mit oder ohne Scheibe,
- *Festigkeit bzw. Festigkeitsklasse der Mutter*: ASTM A563 Grade DH oder C.

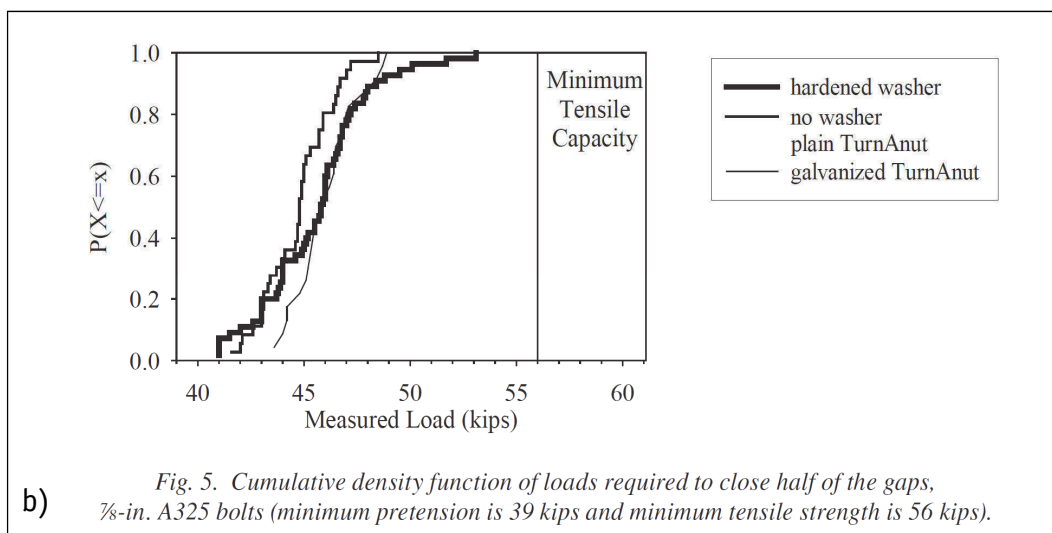
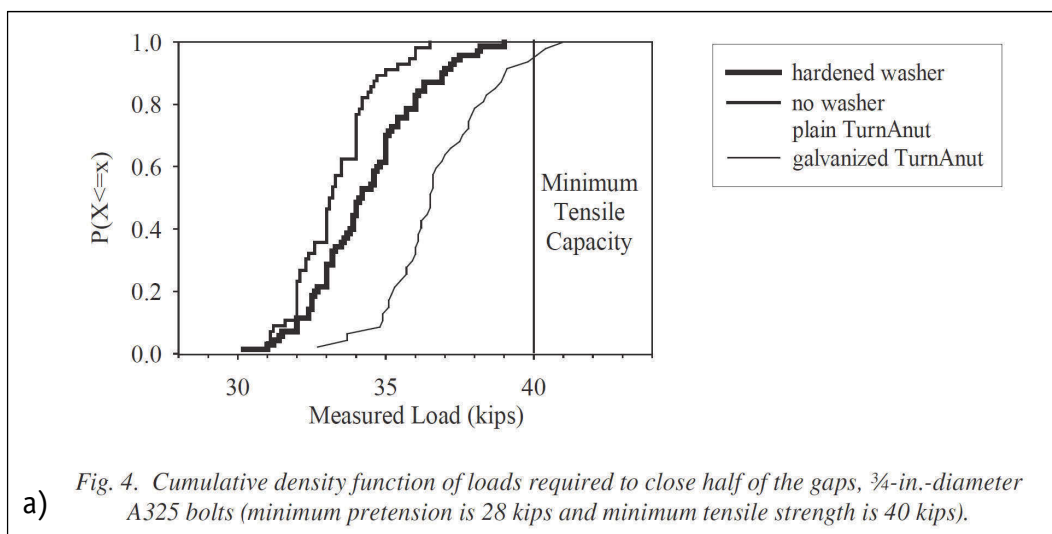
Darüber hinaus wurden neben den gewöhnlichen Muttern und DTI auch solche Muttern mit verliersicher angeformtem DTI (TURNANUT™, siehe Kapitel 3.4) untersucht. Dabei liegt die Mutter direkt auf den Überständen des DTI auf. Eine zusätzliche Scheibe kann und muss nicht dazwischen eingefügt werden.

Die Garnituren wurden in einem SKIDMORE-WILHELM *bolt tension calibrator* – einer hydraulischen Kraftmessdose für Schraubengarnituren – durch Drehen der Mutter (*Mu.rot*) bis zur 1,05-fachen Mindestvorspannkraft angezogen. Die Anzahl der Sperrweiten bzw. der offenen Spalte wurde in diesem Zustand mit einer Fühllehre mit einer Dicke von 0,005" (0,127 mm) bestimmt. Das weitere Anziehen wurde in Schritten von etwa 1 bis 3 kips (4,4 bis 13,3 kN) bis zum Verbleib eines offenen Spaltes bzw. dem Schließen aller Spalte durchgeführt. Die zugehörigen Vorspannkraften wurden protokolliert.

Bild 3.15 zeigt exemplarisch die Verteilung der gemessenen Vorspannkraften, um die Hälfte aller Spalte so weit zusammenzudrücken, dass die verwendete Fühllehre (0,005") nicht mehr eindringen konnte. Grundsätzlich wurde die erforderliche Mindestvorspannkraft von 28 kips (125 kN), siehe Bild 3.15 (a), und 39 kips (173 kN), siehe Bild 3.15 (b), für die Schrauben A325 übertroffen. Ohne gehärtete Scheibe zwischen den Überständen und der gedrehten Mutter wurden allerdings geringere Vorspannkraften als bei Verwendung der gehärteten Scheibe festgestellt. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass das direkte Drehen der Mutter

auf den Überständen bei gleicher Vorspannkraft zu einem früheren Schließen der Spalte führte.

Insgesamt folgerten die Autoren aus den erzielten Versuchsergebnissen, dass es keine „praktischen Unterschiede“ (*practical differences*) zwischen den unterschiedlichen Konfigurationen gab, solange eine gehärtete Mutter (*grade DH*) zur Anwendung kam. Im Gegensatz dazu wurden bei Anwendung von Muttern geringerer Härte (*grade C*) keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt. An der Oberfläche der Mutter wurde Fressen beobachtet, das Einfluss auf den verbleibenden Spalt hatte.



**Bild 3.15.** Kumulierte Summenhäufigkeit der Kräfte, um das Fühllehren-Kriterium zu erfüllen [CRL12]

**Figure 3.15.** Cumulative density function of loads required to close half of the gaps [CRL12]

**REUTHER, BAKER, YETKA, CLEARY & RIDDEL (2014):**

***Relaxation of ASTM A325 Bolted Assemblies* [RBY14]**

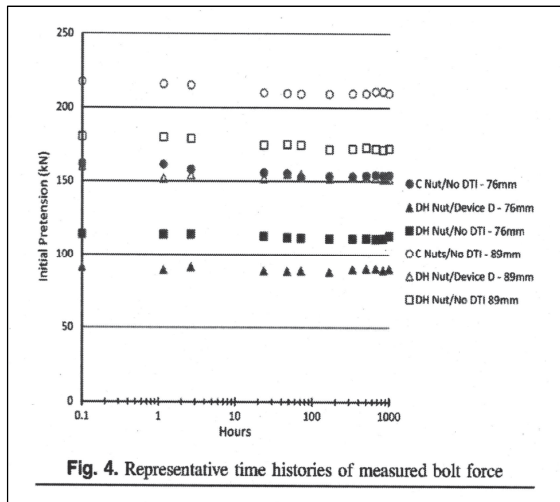
Zur Bestimmung von Vorspannkraftverlusten wurden experimentelle Untersuchungen an ausgewählten Konfigurationen mit Schrauben A325 durchgeführt. Folgende Versuchsparameter wurden berücksichtigt:

- *Schraubendurchmesser*:  $\frac{3}{4}$ " (20 mm) und  $\frac{7}{8}$ " (22 mm),
- *Paketdicke des Bauteils*: 1,5 in. und 2 in.,
- *Konfiguration der Verbindung*: mit oder ohne DTI,
- *Montagekonfiguration des DTI*:  
unter dem Schraubenkopf oder unter der Mutter,
- *Herstellung des DTI*: vergütet (*quenched and tempered*) oder kaltgeformt und gegläht (*cold-worked and annealed*),
- *Festigkeit bzw. Festigkeitsklasse der Mutter*: ASTM A563 Grade DH oder C,
- *Art des Anziehgerätes*: Schraubenschlüssel (manuell) oder Schlagschrauber.

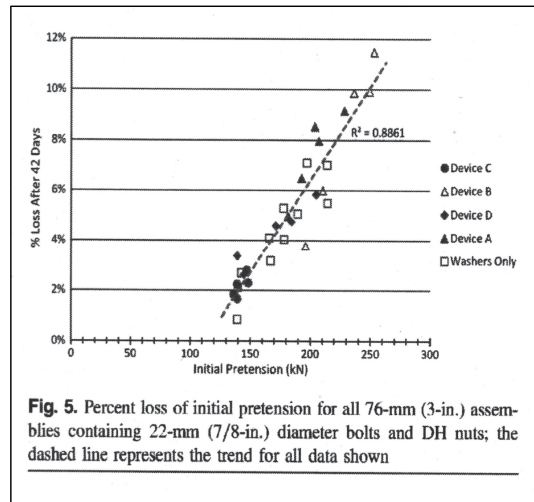
Die Garnituren wurden jeweils in einem einzelnen Blech montiert und vorgespannt. Alle Komponenten der Verbindung waren ohne Oberflächenbeschichtung. Die Vorspannkraft wurde mit Hilfe von Ultraschall-Verfahren zu bestimmten Zeitpunkten über eine Dauer von 1000 Stunden (42 Tagen) gemessen, siehe Bild 3.16 (a). Als Bezugswert zur Bestimmung von relativen Vorspannkraftverlusten, siehe Bilder 3.16 (b) sowie 3.17, diente die Vorspannkraft, die etwa 20 Minuten nach dem letzten Anziehschritt festgestellt wurde. Die Bestimmung der Vorspannkraft erfolgte rechnerisch mit Hilfe der gemessenen Längenänderung aus dem Ultraschall-Verfahren. Eine Kalibrierung und Bewertung des Verfahrens mit Hilfe einer bekannten Schraubenkraft ist nicht dokumentiert.

Die Anwendung unterschiedlicher DTI – *Devices A, B, C und D*, siehe Bild 3.16 (b) – in unterschiedlicher Montagekonfiguration erfolgte offensichtlich mit dem Erreichen unterschiedlich hoher Montagevorspannkkräfte. Ob diese sich aus der Verwendung von Fühllehren ergeben haben oder Vorspannkkräfte anhand der Vorspannkraftmessung eingestellt wurden, ist nicht dokumentiert. Ebenso liegen keine Angaben über den Verbleib eines Spaltes und dessen mögliche Größe nach dem Anziehen vor. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass größere Vorspannkkräfte zu geringeren Spalten zwischen den Überständen führen. Es muss also davon ausgegangen werden, dass die anwachsenden Vorspannkraftverluste bei größeren Vorspannkraften von weiteren Ursachen abzuleiten sind.

Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass die Größe der Montagevorspannkraft der wichtigste Einflussfaktor auf die Größe der Vorspannkraftverluste ist. Der Einfluss unterschiedlicher DTI und unterschiedlicher Montagekonfigurationen wird als relativ unwichtig (*relatively unimportant*) bewertet.



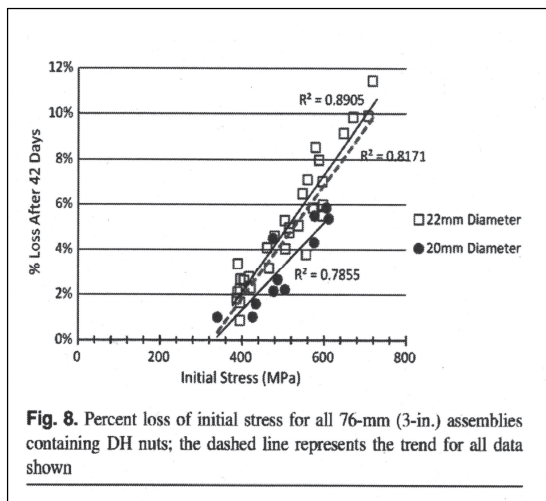
a)



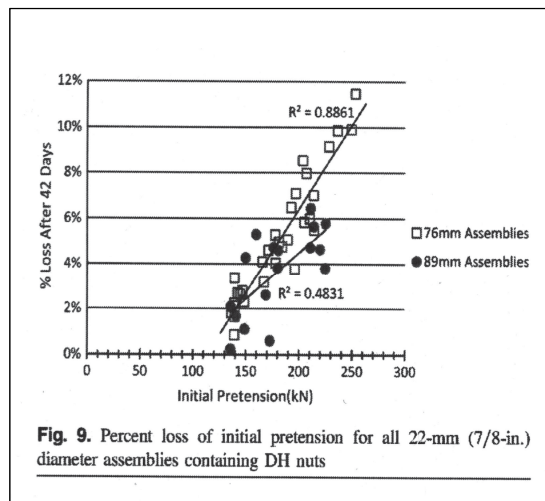
b)

**Bild 3.16.** Zeit- Vorspannkraft-Diagramm (a) und relativer Vorspannkraftverlust nach 42 Tagen für unterschiedliche DTI (b) [RBY14]

**Figure 3.16.** Time-bolt load-diagram (a) and relative loss of preload after 42 days for different types of DTI (b) [RBY14]



a)



b)

**Bild 3.17.** Relativer Vorspannkraftverlust nach 42 Tagen für unterschiedliche Schraubendurchmesser (a) und unterschiedliche Klemmlängen (b) [RBY14]

**Figure 3.17.** Relative loss of preload after 42 days for different bolt lengths (a) and different clamp lengths (b) [RBY14]



### 3.3.3 Untersuchungen und Publikationen der Hersteller – Hintergrund

Die COOPER & TURNER INC war lange Zeit einziger Hersteller von direkten Kraftanzeigern in Nordamerika. Nach mehrjährigen Umstrukturierungen wurde das Unternehmen 1998 schließlich in die TURNASURE LLC umgewandelt.

Zwei ehemalige Mitarbeiter der TURNASURE LLC begannen 1994 mit ihrem neu gegründeten Unternehmen APPLIED BOLTING TECHNOLOGY PRODUCTS INC ebenso mit der Produktion und dem Vertrieb von direkten Kraftanzeigern. Dies führte unmittelbar zu gerichtlichen Auseinandersetzungen mit der heutigen TURNASURE LLC [PAED98].

Seit es zwei Hersteller für direkte Kraftanzeiger in Nordamerika gibt, wurden technische – und vertriebstechnische – Weiterentwicklungen forciert, die vielfach durch Publikationen – vor allem in Verbandszeitschriften wie dem DISTRIBUTOR'S LINK MAGAZINE – beschrieben und beworben werden. Untersuchungen durch externe Prüflaboratorien, die jeweils von den Herstellern in Auftrag gegeben wurden, wurden ebenso zugänglich gemacht.

Ohne inhaltlich auf die verfügbaren Dokumente einzugehen, sei darauf hingewiesen, dass diese auf den Internetseiten der Hersteller zur Verfügung gestellt werden. Ungenannte Beispiele zeigen allerdings, dass gegenüber einigen Dokumenten, die die Hersteller von direkten Kraftanzeigern zur Verfügung stellen, eine kritische Betrachtungsweise geboten ist.

Demgegenüber ist bemerkenswert, dass seitens der TURNASURE LLC auf der eigenen Internetseite folgende Erläuterung zu finden ist:

***„Connection subject to Tension Loads - Commonly used in automotive and general engineering, occasionally used in steel structures and can apply to anchor bolts***

*Insufficiently tensioned bolts in these connections can lead to bolts loosening and falling out or worse failure by fatigue. It is most important that the varying axial tension loads do not exceed the value of the preloaded force in the bolts. (Or forces pulling up on anchor bolts). High preload forces improve bolts fatigue resistance and are the very best guard against loosening. Poor or slack bolt installation can and has lead to catastrophic failure.“* [Tu15a]

Die Gefahr, dass die Verbindung unter Zugbeanspruchung an Vorspannkraft verliert, ist hier benannt. Auch wenn nicht im speziellen die direkten Kraftanzeiger mit ihrem Potential zu erheblichen „nachträglichen“ plastischen Verformungen

hervorgehoben sind – durchaus nachvollziehbar –, so ist ansatzweise die Grundvoraussetzung genannt, dies zu verhindern: axiale Zugkräfte, die kleiner als die Vorspannkraft bleiben. Ob nur die axiale Zugkraft zu begrenzen ist, oder die tatsächliche Schraubenkraft berechnet und begrenzt werden muss, ist zu überprüfen.

Über diese Anmerkungen hinaus ist auf der Internetseite eine Broschüre verfügbar, die offensichtlich als Druckerzeugnis vorlag und digitalisiert wurde. Diese benennt eine striktere Gegenmaßnahme, um Vorspannkraftverluste, das Lösen der Verbindung und Ermüdungsversagen zu verhindern.

**„Control of cyclical stresses.**

*It is very important to make certain on connections subject to cycles of stress along the bolt axis, that the applied force is always significantly lower than the clamping force. DTIs assure the required clamping force is present in the connection. If applied loads are greater than the clamping force, bolts will loosen or fail by fatigue. The maximum permitted stress cycle is 60% of the required minimum bolt load. For infinite endurance under such cyclical stress, the bolts must be installed at, or better still, above the minimum tension. (see table 1).“ [Tu15b]*

Eine Erläuterung, dass die Vorspannkraft nur unmittelbar nach dem Anziehen – und nicht generell – mit dem DTI als vorhanden nachgewiesen werden kann, wäre sachdienlich.

Hier ist zusätzlich gefordert, dass die maximale Beanspruchung der Schraube unterhalb der 0,6-fachen Mindestvorspannkraft liegen muss, um Vorspannkraftverluste zu verhindern. Ob hier bestimmte Regelwerke ohne weitere Angabe zitiert sind, oder eigene Erkenntnisse zu der Aussage geführt haben, bleibt ungewiss. Außerdem ist nicht ersichtlich, wann und unter welchen aktuellen Regelwerken die Broschüre verfasst wurde. Die europäischen Regelwerke zur Berechnung und Bemessung werden unter Berücksichtigung der aktuellen und vormaligen Normung in Kapitel 3.5.2 dargestellt und erläutert.

Die obligatorische Beilage zur Lieferung von direkten Kraftanzeigern ist die Gebrauchsanweisung, die die womöglich nötige Anwendung unterschiedlicher Fühllehren in unterschiedlichen Montagekonfigurationen oder Oberflächenbeschichtungen mitteilt. Die entsprechende Beilage zu den im Zuge dieser Arbeit untersuchten direkten Kraftanzeigern ist ebenso online verfügbar [Tu11]. Für direkte Kraftanzeiger nach EN 14399-9 entfällt – im Gegensatz zu ASTM F959/F959M,

siehe Kapitel 3.5.3.3 – die variable Festlegung der benötigten Fühllehre. Die Fühllehren sind entsprechend Tabelle 2.6 fest vorgeschrieben.

Der Gebrauchsanweisung ist darüber hinaus zu entnehmen:

*„When axial tensile loads are applied to the bolt through the bolted connection, preloading of the connection to a specified minimum is also important, particularly if the loads are cyclical and could induce loosening or fatigue failure of the bolts. **The clamping force developed at the specified minimum bolt preload should be greater than the applied loads.** This will prevent the plies from separating or the bolts from developing any significant increase in axial tensile stress over the installed preload stress.“* [Tu11], S. 2.

Es mangelt dementsprechend nicht an Hinweisen, welche Auswirkungen zu große axiale Zugkräfte haben können und welche Maßnahmen zur Vermeidung getroffen werden sollten. Die besonderen Merkmale der direkten Kraftanzeiger gegenüber vorgespannten Verbindungen mit herkömmlichen Garnituren werden jedoch nicht erwähnt.

### 3.3.4 Zusammenfassung

Es wurde anhand von wissenschaftlichen Untersuchungen, die teilweise oder vollständig auf der Anwendung oder Verwendung von direkten Kraftanzeigern beruhen, gezeigt, welche Problemstellungen erkannt und beseitigt wurden. Vielfach war die zuverlässige Einbringung der Mindestvorspannkraft im Mittelpunkt der Untersuchungen, zumeist im Vergleich mit altbekannten Anziehverfahren und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Oberflächenausführungen, vgl. [SNG94], [DLF96], [SNG99], [CRL12].

Das übermäßige Anziehen bis zum Schließen der Spalte war verständlicherweise Gegenstand einiger Untersuchungen, da es einen erheblichen Aufwand und große Sorgfalt beim Vorspannen bedarf, um es grundsätzlich zu vermeiden. Unter einwirkender Scherbeanspruchung konnte gezeigt werden, dass das übermäßige Anziehen die Tragfähigkeit nicht unzulässig beeinträchtigte [SNG94], [SNG99]. Dennoch sollte die konservative Anforderung bestehen bleiben, dass das vollständige Schließen der Spalte nicht zulässig ist und die Garnitur ausgetauscht werden muss.

Erst in jüngster Vergangenheit wurden Untersuchungen zum Erhalt der Vorspannkraft zugänglich, die eine Abhängigkeit des relativen Vorspannkraftverlustes von der Höhe der erreichten Vorspannkraft aufzeigen [RBY14]. Ob diese Vor-

spannkraftverluste in ihrer absoluten Größe die dauerhafte Erhaltung der Mindestvorspannkraft gefährden, konnte aus den Beschreibungen nicht entnommen werden.

Experimentelle Untersuchungen zu zugbeanspruchten Verbindungen mit direkten Kraftanzeigern sind nur in einem einzigen Beitrag dokumentiert [SI82]. Trotz der unvollständigen Dokumentation von nur vier Zugversuchen – zwei davon mit direkten Kraftanzeigern – können die nachteiligen Eigenschaften – wie sie von OWENS & CHEAL sowie BERENBAK benannt wurden – erkannt werden. Die Sichtweise und die Erklärungsversuche der Autoren dieser Untersuchung zeigen allerdings, dass Zweifel an der Zuverlässigkeit von direkten Kraftanzeigern unter Zugbeanspruchung unbedingt ausgeräumt werden sollten.

Auch ein Hersteller von direkten Kraftanzeigern weist in Produktbroschüren [Tu15b] und der beiliegenden Gebrauchsanweisung [Tu11] auf die grundsätzlichen Auswirkungen zu großer axialer Zugbeanspruchung hin. Die besonderen Eigenschaften des DTI mit dem Potential zu plastischen Verformungen der verbleibenden Überstände werden allerdings nicht erwähnt.

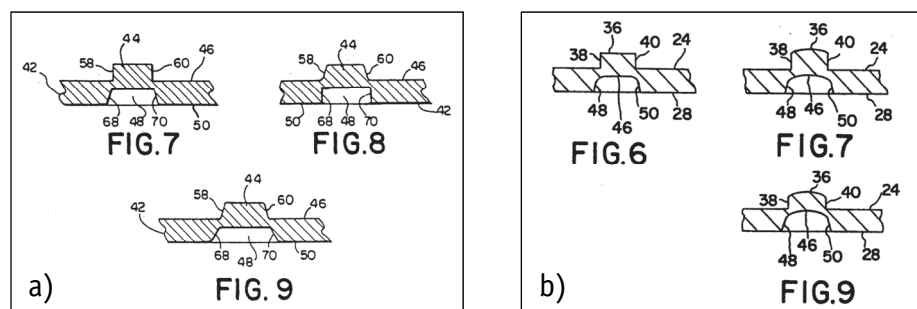
### 3.4 Weiterentwicklung des direkten Kraftanzeigers

Durch den entstandenen Wettbewerb, nicht nur zwischen den unterschiedlichen Anziehmethode, sondern nun durch zwei konkurrierende Hersteller von direkten Kraftanzeigern, wurde vor allem an einer Verbesserung der Handhabung gearbeitet. Die mechanischen Eigenschaften und groben Abmessungen sind hingegen im Zuge der Normung festgeschrieben worden und bieten daher keinen Raum für Alleinstellungsmerkmale des Produkts.

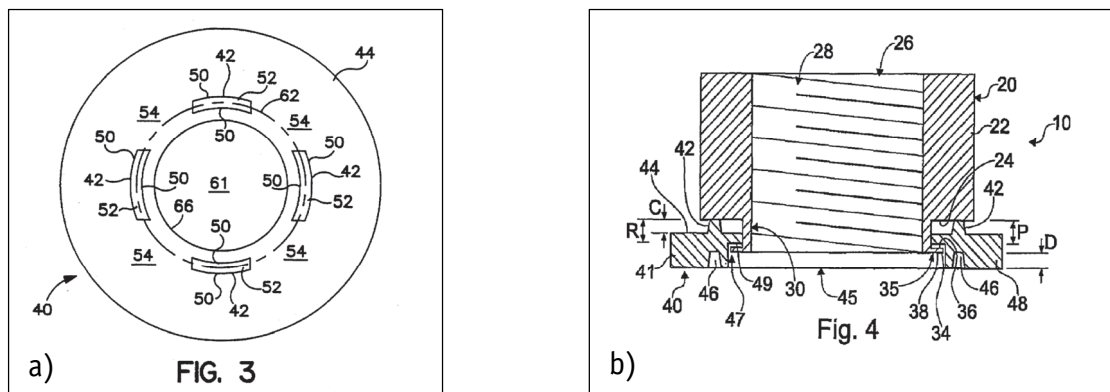
Die Verbesserung der geometrischen Form der Überstände war nicht nur Ansatzpunkt, um die Herstellung zu optimieren, sondern um ein oberflächliches Einreißen des Materials an den Kanten der Überstände beim Stanzen zu vermeiden, siehe Bild 3.18. Sie sollte außerdem dazu führen, dass die obligatorische normale Scheibe zwischen den Überständen und der gedrehten Auflagefläche von Mutter oder Schraubenkopf entfallen könnte, siehe Bild 3.19 (a). Der Zusammenbau der Garnitur wurde fehlerunanfälliger und schneller, indem der direkte Kraftanzeiger verliersicher und frei drehbar an der Mutter befestigt wurde; das System der „Kombimutter“ mit direktem Kraftanzeiger wird unter dem Namen TURNANUT™ vertrieben, siehe Bild 3.19 (b).

Die wohl sichtbarste Entwicklung ist das Auffüllen der Hohlräume unter den Überständen mit einem farbigen Silikon, das je Überstand an einer radialen Nut unter dem DTI entlang nach außen gepresst wird, wenn das Abplatten der Überstände den Hohlraum darunter wieder ausfüllt und das Silikon verdrängt, siehe Bild 3.20. Der Monteur soll anhand der Menge des Austritts den richtigen Zeitpunkt zum Beenden des Anziehens erkennen. Dies ist durch Anziehversuche mit den Monteuren einzuüben. Die Beurteilung des Spaltes bleibt allerdings mit der Fühllehre zu kontrollieren. Die sogenannten SQUIRTER® DTI müssen weiterhin die Anforderungen nach den bestehenden Normen erfüllen, bieten aber dem Monteur und Kontrolleur einen schnellen Überblick über Unregelmäßigkeiten, sofern alle direkten Kraftanzeiger innerhalb einer Gruppe gut sichtbar sind, z. B. bei Laschenstößen.

Das Anziehen in unterschiedlichen definierten Schritten und das Verhindern eines übermäßigen Anziehens wurden offenbar ebenso als kritische Punkte erkannt, wie es das Erreichen einer Mindestvorspannkraft ist. Zweifarbig gefüllte Füllungen könnten ein übermäßiges Anziehen signalisieren, siehe Bild 3.21 (b); Überstände mit zwei unterschiedlichen Höhen könnten mit unterschiedlich gefärbten Füllungen verschiedene Lastniveaus bzw. Anziehschritte kenntlich machen, siehe Bild 3.21 (a). Entsprechende direkte Kraftanzeiger sind allerdings derzeit nicht erhältlich.

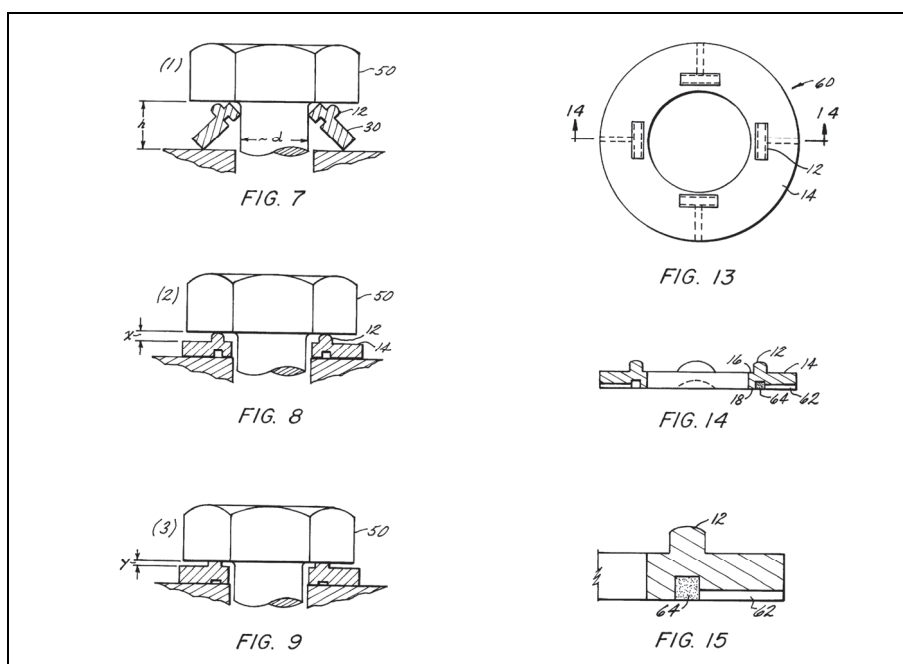


**Bild 3.18.** (a) Direct Tension Indicator Washer (US5015132 A) [TH90],  
 (b) Direct tension indicator washer(US5370483 A) [HL93]  
**Figure 3.18.** (a) Direct Tension Indicator Washer (US5015132 A) [TH90],  
 (b) Direct tension indicator washer(US5370483 A) [HL93]



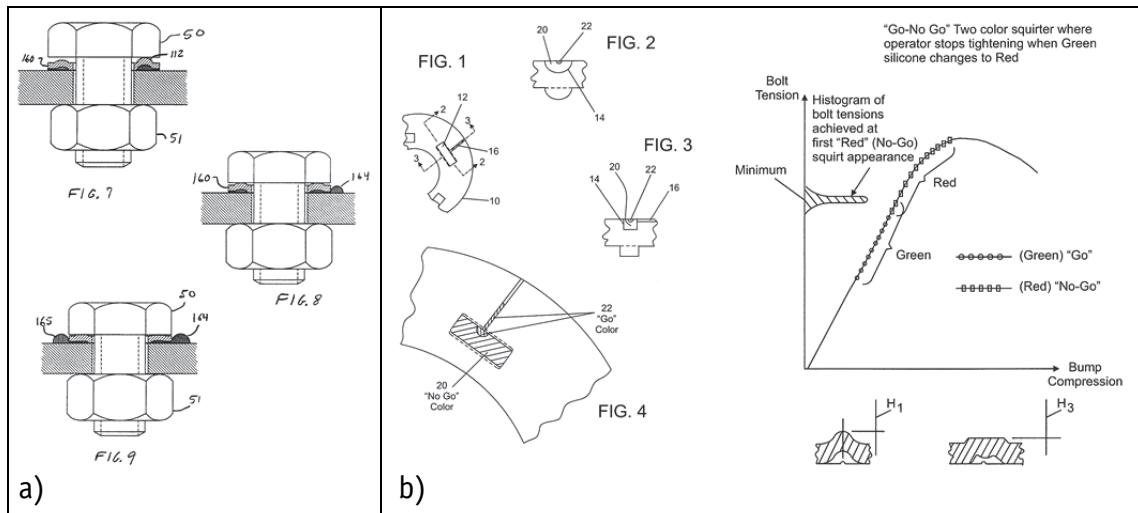
**Bild 3.19.** (a) Direct tension indicator washer (US5667346 A) [Sh96], (b) Load indicating fastener and method of manufacture (US7635243 B2) [TSS06]

**Figure 3.19.** (a) Direct tension indicator washer (US5667346 A) [Sh96], (b) Load indicating fastener and method of manufacture (US7635243 B2) [TSS06]



**Bild 3.20.** Direct tension indicating washers (US5769581 A) [WH97]

**Figure 3.20.** Direct tension indicating washers (US5769581 A) [WH97]



**Bild 3.21.** (a) Direct multi-tension indicating washer having bumps of a first and second height (US6425718 B1) [HW00], (b) Direct tension multi-color indicating washers (US8382409 B2) [Wa10]

**Figure 3.21.** (a) Direct multi-tension indicating washer having bumps of a first and second height (US6425718 B1) [HW00], (b) Direct tension multi-color indicating washers (US8382409 B2) [Wa10]

## 3.5 Normative Regelungen

### 3.5.1 Allgemeines

Nachfolgend werden die normativen Regeln dargestellt und erläutert, die für die Berechnung und Bemessung geschraubter Verbindungen mit direkten Kraftanzeigern sowie für die Prüfung und Anwendung von direkten Kraftanzeigern von Bedeutung sind. Dazu werden sowohl die derzeitig gültigen Normen

- EN 1993-1-8:2005 + AC:2009  
*Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen,*
- EN 14399-9:2009  
*Hochfeste planmäßig vorspannbare Schraubenverbindungen für den Metallbau – Teil 9: System HR oder HV – Direkte Kraftanzeiger für Garnituren aus Schrauben und Muttern*

als auch die entsprechenden Vorgängerdokumente

- BS 5950-1:2000  
*Structural use of steelwork in building — Part 1: Code of practice for design — Rolled and welded sections,*
- BS 4604-1:1970  
*The use of high strength friction grip bolts in structural steelwork metric series — Part 1: General grade,*
- BS 7644-1:1993  
*Direct tension indicators — Part 1: Specification for compressible washers*

berücksichtigt. Darüber hinaus werden folgende nordamerikanische Regelwerke hinsichtlich der Anziehverfahren und Prüfverfahren mit besonderer Beachtung der direkten Kraftanzeiger angesprochen:

- Research Council on Structural Connections (RCSC):2014  
*Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts,*
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO):2010  
*AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications,*
- ASTM F959M:2013  
*Standard Specification for Compressible-Washer-Type Direct Tension Indicators for Use With Structural Fasteners (Metric),*
- ASTM F606M:2013  
*Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally and Internally Threaded Fasteners, Washers, and Rivets (Metric),*
- ASME B18.2.6M-2012  
*Metric Fasteners for Use in Structural Applications,*
- SAE J2486:2013  
*Tension Indicating Washer Tightening Method for Fasteners.*



### 3.5.2 Berechnung und Bemessung

#### 3.5.2.1 Aktuelle Regeln entsprechend EN 1993-1-8

##### Zugbeanspruchung

Entsprechend EN 1993-1-8 beträgt die Beanspruchbarkeit einer Schraubengarnitur unter Zugbeanspruchung:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (3.1)$$

Für Sechskantschrauben ist die Beanspruchbarkeit unter Berücksichtigung des Beiwertes  $k_2$  und des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_{M2}$  gleichwertig unter Berücksichtigung der Mindestvorspannkraft  $F_{p,C}$  nach Gleichung (2.1) wie folgt zu bestimmen:

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{1,25} = \frac{0,9}{1,25} \frac{0,7}{0,7} f_{ub} \cdot A_s = \frac{0,9}{1,25 \cdot 0,7} \cdot F_{p,C} \cong 1,03 \cdot F_{p,C} \quad (3.2)$$

Für den Nachweis von Zugverbindungen gilt sowohl für nicht vorgespannte Verbindungen der Kategorie D als auch für vorgespannte Verbindungen der Kategorie E im Grenzzustand der Tragfähigkeit folgendes Kriterium:

$$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd} \quad (3.3)$$

Für die Kategorie E ist eine Berücksichtigung der Vorspannkraft innerhalb der einwirkenden Zugkraft  $F_{t,Ed}$  nicht vorgesehen und nicht erforderlich, da die Vorspannkraft im Grenzzustand der Tragfähigkeit durch plastische Verformungen der Schraubengarnitur vollständig abgebaut wird und die Zugtragfähigkeit nicht beeinträchtigt ist, vgl. [HV02]. Für Verbindungen der Kategorie D mit Vorspannung, die bei der Bemessung nicht benötigt und nicht berücksichtigt wird, gilt dies analog.

Im Grenzfall ist eine einwirkende Zugkraft folgender Größe zulässig:

$$F_{t,Ed} \leq 1,03 \cdot F_{p,C} \quad (3.4)$$

Im Rahmen regelkonform ausgeführter Anziehverfahren ist es dementsprechend möglich, dass die einwirkende Zugkraft  $F_A = F_{t,Ed}$  die vorhandene Vorspannkraft  $F_V \geq F_{p,C}$  übertrifft. Unter Berücksichtigung der mechanischen Zusammenhänge des Verspannungsschaubildes, vgl. Bild 2.4, ist ersichtlich, dass die tatsächlich auftretende Schraubenkraft  $F_S$ , bestehend aus der Vorspannkraft  $F_V$  und der Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$ , in Abhängigkeit von den Steifigkeitsverhältnissen das vorhandene Vorspannkraftniveau der unbeanspruchten Verbindung übersteigt.

Die Vorspannkraft  $F_V$  bleibt nach der Rücknahme der einwirkenden Zugkraft  $F_A$  nur erhalten, falls keine plastischen Verformungen innerhalb der Schraubengarnitur und Bauteile auftreten. Da die Anwendung von direkten Kraftanzeigern planmäßig auf der Ausnutzung von plastischen Verformungen der Überstände beruht, sind Vorspannkraftverluste infolge von weiteren plastischen Verformungen der nicht vollständig abgeplatteten Überstände zu befürchten.

Für Schraubenverbindungen ohne direkten Kraftanzeiger tritt zwar ebenso eine Vergrößerung der vorhandenen Schraubenkraft, d.h. Vorspannkraft, unter einwirkender Zugbeanspruchung ein; daraus resultieren in der Regel aber nur geringfügige Vorspannkraftverluste infolge erstmalig erhöhter Flächenpressungen in allen Kontaktfugen. Dies gilt für axial zentrische Beanspruchung; bei exzentrischer Beanspruchung sind gegebenenfalls Biegung und lokale Kantenpressungen zu berücksichtigen, die sich ungünstig auswirken können, vgl. auch [SI82].

Eine plastische Verformung der Schraubengarnitur ist unter axialer Betriebsbeanspruchung selbst bei einem vorausgegangenen Anziehen bis in den plastischen Bereich normalerweise nicht zu erwarten. Infolge der beim drehenden Anziehen kombinierten Beanspruchung aus Torsionsmoment und Normalkraft tritt das Plastizieren gegenüber einer reinen Zugbeanspruchung entsprechend frühzeitig ein. Nach Abschluss des Anziehens und dem Abbau der Torsionsbeanspruchung durch elastisches Rückfedern stehen entsprechende Reserven für eine reine Axialbeanspruchung im Bereich elastischer Verformungen zur Verfügung, vgl. [KTW07], [HV02] sowie [OC89].

Falls es doch zu weiteren plastischen Verformungen der Schraubengarnitur kommen sollte, so bewirken diese mit dem folgenden Vorspannkraftverlust die Rückführung in den Bereich elastischer Verformungen für zukünftige Lastwechsel. Das nun eingestellte Vorspannkraftniveau liegt aufgrund des ausreichend großen Abstandes zwischen der Vorspannkraft an der Streckgrenze der Garnitur und der Mindestvorspannkraft in der Regel über dieser.

Unter Beachtung und Einhaltung der dargelegten derzeitigen Regeln entsprechend EN 1993-1-8 und EN 1090-2 besteht offensichtlich die Möglichkeit, dass die Montagevorspannkraft  $F_M \geq F_{p,c}$  durch die Schraubenkraft  $F_S$  unter Betriebsbeanspruchung, d.h. unter einwirkender Zugkraft  $F_{t,Ed}$ , überschritten wird. Während dies für alle Schraubenverbindungen – mit oder ohne DTI – eine temporäre Zunahme der Flächenpressung in allen Kontaktfugen bedeutet, sind die Auswirkungen für direkte Kraftanzeiger unverkennbar. Die Überstände des DTI befin-

den sich während des Anziehens und nach Abschluss der Montage direkt im Grenzzustand der „zulässigen“ Flächenpressung – die Grenzflächenpressung ist erreicht. Jegliche Zunahme der Flächenpressung bewirkt eine zusätzliche plastische Verformung, die zu Vorspannkraftverlusten führt.

Tritt die bereits für Schraubengarnituren ohne DTI dargelegte Wirkung eines Vorspannkraftverlustes durch plastische Verformungen ein, so erfolgt auch mit DTI eine Rückführung zukünftiger Lastwechsel in den Bereich elastischer Verformungen. Es gibt allerdings zwei entscheidende Unterschiede: zum einen sind die plastischen Verformungen – und damit die Vorspannkraftverluste – womöglich wesentlich größer, zum anderen liegt das abgesenkte Vorspannkraftniveau aufgrund des ursprünglichen Vorspannkraftniveaus – nahe der Mindestvorspannkraft – nun deutlich unterhalb der Mindestvorspannkraft. Die Tragfähigkeit für scherbeanspruchte gleitfeste Verbindungen ist damit erheblich verringert, falls das Klaffen der Trennfuge eintritt sogar komplett verloren. Mit dem Klaffen der Trennfuge wäre ebenso die Tragfähigkeit gegenüber Ermüdungsbeanspruchung aus Zugkräften verloren.

Für den Nachweis einer Ermüdungsbeanspruchung gemäß EN 1993-1-9 ist die Höhe der Last- bzw. Spannungswechsel in der Schraube relevant. Diese sind auch unter Berücksichtigung eines möglichen Klaffens der Trennfuge und einer Biegebeanspruchung der Schraube aus Abstützkräften zu bestimmen und dementsprechend zu begrenzen, wobei weitere Regelungen nicht spezifiziert sind. In den Regeln für Ermüdungsnachweise ist keine zusätzliche Begrenzung des Lastniveaus und der resultierenden Schraubenkraft vorgesehen. Der Ermüdungsnachweis ist formal auch bei klaffender Verbindung führbar, solange die vorhandene Spannungsschwingbreite ausreichend gering ist oder in ausreichend geringer Anzahl vorkommt.

Als theoretische Obergrenze der einwirkenden Zugbeanspruchung besteht ebenso die zulässige Beanspruchbarkeit entsprechend EN 1993-1-8, wobei hierfür höhere Teilsicherheitsbeiwerte auf der Seite der Einwirkungen zu berücksichtigen sind. Die entsprechenden Einwirkungen im Grenzzustand der Ermüdung liegen diesbezüglich darunter.

Zum Nachweis zugbeanspruchter Verbindungen nach EN 1993-1-8 ist zusammenfassend festzuhalten, dass

- die zulässige Zugbeanspruchung  $F_{t,Ed}$  die Mindestvorspannkraft  $F_{p,C}$  übersteigen darf ( $F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd} = 1,03 F_{p,C}$ ),
- die tatsächliche Schraubenkraft  $F_S$  infolge der Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$  unter äußerer Zugbeanspruchung  $F_{t,Ed}$  die bei der Montage vormals größte Schraubenkraft bzw. Montagevorspannkraft  $F_M$  signifikant übersteigen kann,
- das erstmalige bzw. wiederholte Auftreten einer Schraubenkraft oberhalb der Montagevorspannkraft für gewöhnliche Verbindungen ohne DTI in der Regel nur zu geringfügigen Vorspannkraftverlusten infolge erhöhter Flächenpressungen in allen Kontaktfugen führt,
- eine Schraubenkraft oberhalb der Montagevorspannkraft in Verbindungen mit DTI eine weitere plastische Verformung der Überstände verursachen kann, die zu erheblichen Vorspannkraftverlusten führt, da die „zulässige“ Flächenpressung während und direkt nach der Montage vollständig ausgenutzt ist und
- unter Ermüdungsbeanspruchung nur die relative Größe der Last- bzw. Spannungswechsel und deren Anzahl zu berücksichtigen ist, das Lastniveau aber nicht gesondert begrenzt ist, so dass das Klaffen der Trennfuge nicht grundsätzlich ausgeschlossen wird.

### Kombinierte Scher- und Zugbeanspruchung gleitfester Verbindungen

Entsprechend EN 1993-1-8 beträgt die Beanspruchbarkeit einer gleitfesten Verbindung mit hochfesten Schrauben unter kombinierter Scher- und Zugbeanspruchung:

$$F_{s,Rd(,ser)} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3(,ser)}} \cdot (F_{p,C} - 0,8 \cdot F_{t,Ed(,ser)}) \quad (3.5)$$

Damit gemäß Gleichung (3.5) eine Vorspannkraft in den Reibflächen auch unter in Richtung der Schraubenachse einwirkender Zugbeanspruchung  $F_{t,Ed}$  erhalten bleibt, muss gelten:

$$F_{p,C} - 0,8 \cdot F_{t,Ed(,ser)} \geq 0 \quad (3.6)$$

Damit ist die einwirkende Zugkraft  $F_{t,Ed}$  folgendermaßen zu begrenzen:

$$F_{t,Ed(,ser)} \leq 1,25 \cdot F_{p,C} \quad (3.7)$$

Unter Berücksichtigung der allgemein zulässigen Zugbeanspruchung  $F_{t,Ed}$  gemäß Gleichung (3.2) ist diese Grenze nicht ausnutzbar. Der kleinere Wert der Beanspruchbarkeit ist wie folgt maßgebend:

$$F_{t,Ed(,ser)} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} 1,25 \cdot F_{p,C} \\ 1,03 \cdot F_{p,C} \end{array} \right. \quad (3.8)$$

Für den Nachweis von gleitfesten Verbindungen der Kategorien B – im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (*ser*) – und C – im Grenzzustand der Tragfähigkeit – gilt mit oder ohne zusätzlicher Zugbeanspruchung folgendes Kriterium:

$$F_{v,Ed(,ser)} \leq F_{s,Rd(,ser)} \quad (3.9)$$

Dabei ist der Nachweis gegen die einwirkende Zugbeanspruchung gesondert entsprechend Gleichung (3.3) zu führen.

Der Klammerausdruck in Gleichung (3.5) beruht auf den mechanischen Prinzipien des Verspannungsschaubildes. Die einwirkende axiale Zugkraft  $F_A = F_{t,Ed}$  vermag die Klemmkraft in der Trennfuge nur anteilig in Abhängigkeit von den Steifigkeitsverhältnissen aufzuheben. Offensichtlich liegt hier die Annahme zu Grunde, dass das Kraftverhältnis  $\Phi$ , siehe Bild 2.4, 0,2 beträgt.

Mit dem Kraftverhältnis  $\Phi = 0,2$  lassen sich für die üblicherweise im Stahlbau vorliegenden Steifigkeitsverhältnisse überaus große Schraubenzusatzkräfte  $F_{SA}$  ermitteln, für die ein Ermüdungsnachweis mit den resultierenden Spannungsschwingbreiten konservativ geführt werden kann. Für die Ermittlung der Restklemmkraft in der Trennfuge ist diese Annahme allerdings nicht konservativ. Der tatsächliche Kraftangriff liegt innerhalb der geklemmten Bauteile. Dies führt zu geringeren Schraubenzusatzkräften  $F_{SA}$ , allerdings auch zur größeren Entlastung der Trennfuge. Das anzuwendende Kraftverhältnis  $\Phi$  sollte dementsprechend mit höchstens 0,1 angesetzt werden, besser noch darunter liegen – und zwar insbesondere deshalb, da keine individuelle Berechnung z. B. gemäß VDI 2230-1 gefordert ist. Die daraus resultierende Verringerung der Vorspannkraft gemäß Gleichung (3.5) wäre entsprechend auf mindestens 0,9  $F_{t,Ed}$  angehoben.

Die Annahme, dass die tatsächlich ausgeführten Vorspannkraft über dem Niveau der Mindestvorspannkraft  $F_{p,C}$  liegen und somit eine erhöhte Sicherheit gegen das Entlasten oder sogar Klaffen der Trennfuge besteht, scheint für viele An-

wendungsfälle zutreffend zu sein. Dennoch kann davon nicht generell ausgegangen werden, da die geregelten Anziehverfahren „nur“ das Erreichen der Mindestvorspannkraft unter Berücksichtigung der immanenten Streuungen sicherstellen müssen.

An dieser Stelle ist die Frage zu stellen, warum bei der Bestimmung des Bemessungswertes des Gleitwiderstandes entsprechend Gleichung (3.5) auf die Anwendung des Bemessungswertes der Vorspannkraft  $F_{p,Cd}$  gemäß Gleichung (2.2) verzichtet wird. Die einschlägigen Kommentare liefern hierzu keine Hinweise, vgl. [US15], [UPU15]. Eine Berücksichtigung der nötigen Sicherheitsanforderungen an die Vorspannkraft – neben derjenigen an die Haftreibungszahl  $\mu$  – durch den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M3(,ser)}$  anstelle des Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_{M7}$ , scheint eine mögliche Erklärung zu sein. Eine solche Vorgehensweise wird allerdings den Auswirkungen von mangelnder Vorspannkraft nicht vollends gerecht. Die auf der einen Seite „scharfe“ Berücksichtigung der anteiligen Entlastung der Trennfuge würde auf der anderen Seite durch die „unscharfe“ Verwendung von Teilsicherheitsbeiwerten aufgeweicht.

Eine mögliche Berücksichtigung jeglicher Art von Vorspannkraftverlusten – und damit mangelnder Vorspannkraft – innerhalb der anzusetzenden Haftreibungszahl  $\mu$  ist anhand der vorgeschriebenen *Prüfung zur Bestimmung der Haftreibungszahl* gemäß EN 1090-2, Anhang G nicht zu erkennen. Die Prüfung schließt zwar die Einflüsse des Setzens in den Kontaktfugen und die der Querdehnung der senkrecht zur Schraubenachse zugbeanspruchten Bleche ein; eine Zugbeanspruchung der Bleche in Richtung der Schraubenachse bleibt jedoch unberücksichtigt.

Zum Nachweis gleitfester Verbindungen unter kombinierter Scher- und Zugbeanspruchung nach EN 1993-1-8 ist zusammenfassend festzuhalten, dass

- das Auftreten der vollen Zugbeanspruchung  $F_{t,Ed} = F_{t,Rd} = 1,03 F_{p,C}$  unter entsprechender Abminderung des Gleitwiderstandes  $F_{s,Rd}$  zulässig ist,
- die Entlastung der Trennfuge durch eine einwirkende Zugbeanspruchung gegebenenfalls in höherem Maße berücksichtigt werden sollte und
- die Höhe der tatsächlich vorhandenen Vorspannkraft gegebenenfalls durch die Berücksichtigung des Bemessungswertes der Vorspannkraft  $F_{p,Cd}$  zusätzlich abgesichert werden könnte.

### 3.5.2.2 Vormalige Regeln entsprechend BS 5950-1:2000

#### Kombinierte Scher- und Zugbeanspruchung gleitfester Verbindungen

Entsprechend BS 5950-1:2000 ist der Nachweis einer gleitfesten Verbindung mit hochfesten Schrauben unter kombinierter Scher- und Zugbeanspruchung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) mit folgendem Kriterium zu führen:

$$\frac{F_s}{P_{sL,ULS}} + \frac{F_{tot}}{0,9 \cdot P_o} \leq 1 \quad (3.10)$$

Dabei ist

- $F_s$  die einwirkende Abscherkraft auf eine Schraube  $\{\sim F_{v,Ed}\}$ ;
- $F_{tot}$  die einwirkende Zugkraft auf eine Schraube,  
einschließlich Abstützkräften  $\{\sim F_{t,Ed}\}$ ;
- $P_{sL}$  der Gleitwiderstand einer vorgespannten Schraube  $\{\sim F_{s,Rd}\}$ ;
- $P_o$  die Mindestvorspannkraft  $\{\approx F_{p,c}\}$ .

Die einwirkende Zugbeanspruchung ist dementsprechend wie folgt zu begrenzen:

$$F_{tot} \leq 0,9 \cdot P_o \quad (3.11)$$

Der Gleitwiderstand einer Schraube ist im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) wie folgt zu bestimmen:

$$P_{sL,ULS} = P_{sL} = 0,9 \cdot K_s \cdot \mu \cdot P_o \quad (3.12)$$

Dabei ist

- $K_s$  der Beiwert für die Art des Schraubenloches  $\{\sim k_s\}$ ;
- $\mu$  die Reibungszahl.

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) ist folgendes modifiziertes Kriterium mit denselben Bemessungswerten der Einwirkungen aus dem Grenzzustand der Tragfähigkeit anzuwenden:

$$\frac{F_s}{P_{sL,SLS}} + \frac{F_{tot}}{1,1 \cdot P_o} \leq 1 \quad (3.13)$$

Hierfür ist zusätzlich zu berücksichtigen:

$$F_{tot} \leq A_t \cdot p_t \quad (3.14)$$

Dabei ist

- $A_t$  der Spannungsquerschnitt der Schraube  $\{= A_s\}$ ;
- $p_t$  der „Bemessungswert“ der Zugfestigkeit einer Schraube  $\{\approx 0,7 f_{ub}\}$ .

Der Gleitwiderstand einer Schraube ist im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) wie folgt zu bestimmen:

$$P_{\text{SL,SLS}} = P_{\text{SL}} = 1,1 \cdot K_s \cdot \mu \cdot P_o \quad (3.15)$$

Durch Einsetzen von (3.15) und (3.12) in (3.13) und Umformen ergibt sich:

$$\frac{0,9 \cdot F_s}{1,1 \cdot 0,9 \cdot K_s \cdot \mu \cdot P_o} + \frac{0,9 \cdot F_{\text{tot}}}{1,1 \cdot 0,9 \cdot P_o} = \frac{F_s/1,22}{P_{\text{SL,ULS}}} + \frac{F_{\text{tot}}/1,22}{0,9 \cdot P_o} \leq 1 \quad (3.16)$$

Der berücksichtigte Teilsicherheitsbeiwert beträgt dementsprechend:

$$\gamma = 1,22 \quad (3.17)$$

Um eine anschauliche Vergleichbarkeit mit Gleichung (3.5) gemäß EN 1993-1-8 herzustellen, ergibt sich durch Einsetzen von (3.12) in (3.10) und Umformen folgendes Kriterium:

$$F_s \leq 0,9 \cdot K_s \cdot \mu \cdot (P_o - 1,11 \cdot F_{\text{tot}}) \quad (3.18)$$

Zum Nachweis einer kombinierten Scher- und Zugbeanspruchung in gleitfesten Verbindungen sieht BS 5950-1 eine Begrenzung der zulässigen Zugbeanspruchung auf 90 % der Mindestvorspannkraft  $P_o$  ( $\approx F_{p,c}$ ) vor, siehe (3.11). Dementsprechend ist zur Bestimmung des infolge der Zugbeanspruchung abgeminderten Gleitwiderstandes eine Subtraktion der 1,11-fachen einwirkenden Zugkraft  $F_{\text{tot}}$  von der Mindestvorspannkraft  $P_o$  vorzunehmen.

### Zugbeanspruchung

Es ist anzumerken, dass BS 5950-1 die anzuwendenden Nachweiskriterien für vorgespannte Schraubenverbindungen primär von der Art der auszuführenden Scherverbindung abhängig macht. Dies sind

- Scher-/Lochleibungsverbindungen ( $\sim$  Kat. A),
- gleitfeste Verbindungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ( $\sim$  Kat. B) und
- gleitfeste Verbindungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit ( $\sim$  Kat. C).

Vorgespannte Verbindungen, die nicht zur Übertragung von Scherbeanspruchungen mit Hilfe des Gleitwiderstandes als gleitfeste Verbindung bemessen werden, sind dementsprechend wie nicht vorgespannte Verbindungen zu behandeln. Eine Ableitung einer reinen Zugtragfähigkeit aus den Nachweiskriterien für die kombinierte Scher- und Zugbeanspruchung dürfte allerdings zulässig sein.



Für eine Zugbeanspruchung im Grenzzustand der Tragfähigkeit lautet das Nachweiskriterium unter Berücksichtigung der Regeln für gleitfeste Verbindungen entsprechend Gleichung (3.11):

$$F_{\text{tot}} \leq 0,9 \cdot P_0$$

Wird der Gleitwiderstand nicht benötigt, darf für vorgespannte Verbindungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit folgendes Nachweiskriterium, das auch für nicht vorgespannte Verbindungen gilt, angewendet werden:

$$F_{\text{tot}} \leq P_t \quad (3.19)$$

Dabei ist

$P_t$  die Zugtragfähigkeit einer Schraube  $\{\approx F_{t,Rd}\}$ .

Die Zugtragfähigkeit von nicht vorgespannten Verbindungen und vorgespannten, nicht gleitfesten Verbindungen wird wie folgt berechnet:

$$P_t = p_t \cdot A_t \quad (3.20)$$

Die Zugtragfähigkeit  $P_t$  lässt sich unter Berücksichtigung der Mindestvorspannkraft  $P_0$  entsprechend BS 4604-1 gleichwertig wie folgt bestimmen:

$$P_t = p_t \cdot A_t = 0,7 \cdot U_b \cdot A_t = P_0 \quad (3.21)$$

Dabei ist

$U_b$  die Mindestzugfestigkeit einer Schraube  $\{\approx R_m \approx f_{ub}\}$ .

Daraus folgt das Nachweiskriterium für eine vorgespannte, nicht gleitfeste Verbindung in Abhängigkeit von der Mindestvorspannkraft:

$$F_{\text{tot}} \leq P_0 \quad (3.22)$$

Für die Bemessung einer vorgespannten Verbindung unter Zugbeanspruchung obliegt es anscheinend dem Tragwerksplaner, das geeignete Nachweiskriterium auszuwählen und anzuwenden. Die Vorgehensweise bei Ermüdungsbeanspruchung wird in BS 5950-1 nicht gesondert geregelt oder kommentiert.

In [SCI03] wird kommentiert, dass vorgespannte Schrauben normalerweise nur in gleitfesten Verbindungen angewendet werden. Die vorhandenen Regeln sind in der vorliegenden Form dementsprechend nachvollziehbar.

### 3.5.2.3 Vormalige Regeln entsprechend BS 4604-1:1970

#### Kombinierte Scher- und Zugbeanspruchung gleitfester Verbindungen

Entsprechend BS 4604-1:1970 ist der Gleitwiderstand einer gleitfesten Verbindung unter kombinierter Scher- und Zugbeanspruchung im Grenzzustand der Tragfähigkeit wie folgt zu bestimmen:

$$\frac{\mu \cdot n}{\gamma} \cdot (P_o - 1,7 \cdot F_{\text{tot}}) \quad (3.23)$$

Dabei ist

- $n$  die Anzahl der Gleitfugen,
- $\gamma$  ein Sicherheitsbeiwert,
- $P_o$  die Prüfkraft bzw. Mindestvorspannkraft  $\{\approx F_{p,c}\}$ .

Damit gemäß (3.23) eine Vorspannkraft in den Reibflächen auch unter in Richtung der Schraubenachsen einwirkender Zugbeanspruchung  $F_{\text{tot}}$  zur Verfügung steht, muss gelten:

$$P_o - 1,7 \cdot F_{\text{tot}} \geq 0 \quad (3.24)$$

Damit ist die einwirkende Zugkraft  $F_{\text{tot}}$  folgendermaßen zu begrenzen:

$$F_{\text{tot}} \leq 0,59 \cdot P_o \approx 0,6 \cdot P_o \quad (3.25)$$

#### Zugbeanspruchung

Entsprechend BS 4604-1 ist folgendes Nachweiskriterium unter reiner Zugbeanspruchung im Grenzzustand der Tragfähigkeit anzuwenden:

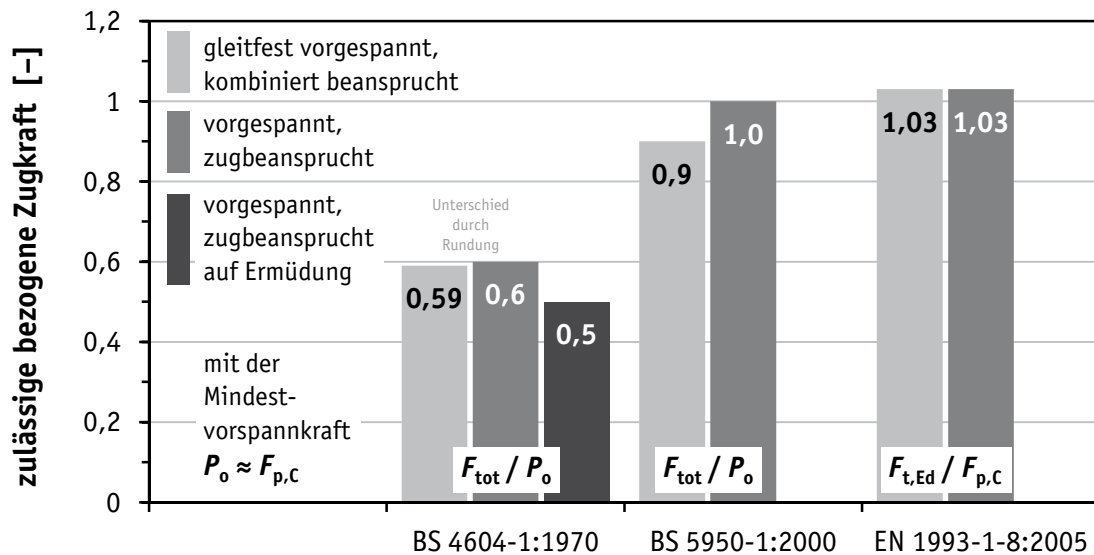
$$F_{\text{tot}} \leq 0,6 \cdot P_o \quad (3.26)$$

Bei Ermüdungsbeanspruchung gilt folgendes Nachweiskriterium:

$$F_{\text{tot}} \leq 0,5 \cdot P_o \quad (3.27)$$

### 3.5.2.4 Gegenüberstellung und Bewertung

Unter Berücksichtigung von BS 4604-1:1970, BS 5950-1:2000 und EN 1993-1-8:2005 wurde deutlich, dass die normativen Regeln für den Nachweis von vorgespannten zugbeanspruchten Verbindungen von 1970 an bis heute deutlichen Veränderungen unterlagen. Die entsprechenden Regeln wurden analysiert und umgeformt, so dass ein unmittelbarer Vergleich möglich ist, siehe Bild 3.22.



**Bild 3.22.** Zulässige einwirkende Zugkräfte für vorgespannte Schrauben

**Figure 3.22.** Permitted total applied tension in preloaded bolts

Dementsprechend wurde 1970 die zulässige Zugkraft für reine Zugbeanspruchung in Abhängigkeit von der Mindestvorspannkraft zu  $0,6 P_0$  definiert. Dieselbe zulässige Zugkraft wurde auch dem Nachweiskriterium für kombinierte Scher- und Zugbeanspruchung zugrunde gelegt. Das gewählte Niveau war zum einen dazu geeignet, ein Klaffen der Trennfuge zu verhindern und zum anderen den Zuwachs zur vorhandenen Vorspannkraft  $F_5$  um die Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$  sehr gering zu halten. Für die Verwendung von direkten Kraftanzeigern war dies ein geeignetes Nachweiskriterium, um verfahrensimmanente Vorspannkraftverluste zu verhindern. Es darf allerdings bezweifelt werden, dass das Niveau der zulässigen Zugkraft in Abhängigkeit von der Mindestvorspannkraft bewusst für die aufkommende Anwendung von direkten Kraftanzeigern implementiert wurde. Zur damaligen Zeit unterlagen sämtliche nationalen wie internationalen Regelwerke für gleitfest vorgespannte Verbindungen einer ähnlichen Bemessungsphilosophie. Die zulässige Zugbeanspruchung war für vorgespannte Verbindungen auf einen Bereich der 0,6- bis 0,8-fachen Mindestvorspannkraft begrenzt. Dies ist u. a. einer zusammenfassenden tabellarischen Darstellung von STEINHARDT ET AL. [SMV69] zu entnehmen. Die Reduzierung der Vorspannkraft infolge des Abbaus der Klemmkraft in den Trennfugen einer gleitfesten Verbindung hatte dementsprechend mindestens mit der 1,0-fachen einwirkenden Zugbeanspruchung zu erfolgen.

Wie bereits erwähnt – vgl. OWENS & CHEAL [OC89] in Kapitel 3.2 – war spätestens 1989 bekannt, unter welchen Umständen direkte Kraftanzeiger erhebliche Vorspannkraftverluste verursachen können. Die Art ihrer Verwendung – z. B. in gleitfest vorgespannten Laschenverbindungen – oder die Art ihrer Montage – z. B. durch Anziehen über das vollständige Abplatten der Überstände hinaus – scheint offenbar keine Anzeichen für kritische Vorspannkraftverluste gezeigt zu haben, so dass mit der Einführung von BS 5950-1:2000 die zulässige Zugbeanspruchung in gleitfesten Scherverbindungen auf  $0,9 P_0$  angehoben wurde, siehe Bild 3.22. Gleichzeitig entfiel die gesonderte Betrachtung von vorgespannten Zugverbindungen zugunsten des allgemeinen Nachweiskriteriums für nicht vorgespannte Verbindungen.

Diese Entwicklung betraf vornehmlich den britischen Stahlbau, dessen bewährte Ausführungspraxis sicherlich in den Regelwerken abgebildet war, ohne hierzu besondere Erläuterungen beizufügen. Zumindest wird in [SCI03] die bevorzugte Verwendung der Vorspannung in gleitfesten Verbindungen angedeutet. Für den Brückenbau liefert [SCI15] ebenso Hinweise auf die bevorzugte bzw. zu bevorzugende Anwendung vorgespannter Verbindungen. Grundsätzlich sollten scherbeanspruchte Verbindungen – möglichst in zweiseitiger Form – verwendet werden, siehe Bild 3.23 [BCSA10b] und Bild 1.1 (b). Dass hier zum Vorspannen allerdings nicht zwangsläufig direkte Kraftanzeiger verwendet werden, wurde in Kapitel 3.1.1 erläutert.

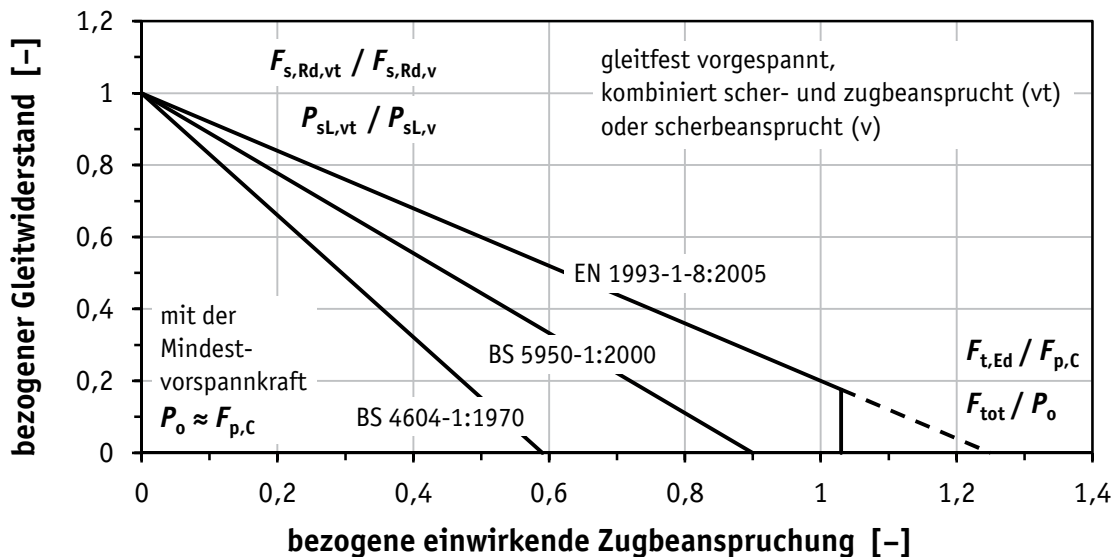
Mit Einführung des Eurocodes wurde die zulässige Zugbeanspruchung für sämtliche Ausführungsformen bzw. Kategorien – nicht vorgespannt, vorgespannt und gleitfest vorgespannt – einheitlich implizit mit  $1,03 F_{p,c}$  festgelegt. Die Abminderung der zulässigen Scherbeanspruchung für gleitfeste Verbindungen muss dabei selbstverständlich beachtet werden. Bild 3.24 zeigt die Abminderung der zulässigen Scherbeanspruchung in Abhängigkeit von der – auf die vorgespannte Schraube – einwirkenden Zugbeanspruchung. Eine entsprechend große zulässige Zugbeanspruchung bringt vordergründig für die Bemessung des Tragwerks wirtschaftliche Vorteile. Sicherheitsrelevante Konsequenzen sind allerdings zu befürchten, falls die erforderliche Vorspannkraft nicht dauerhaft erhalten bleibt.

Im Übrigen war Gleichung (3.5) mit dieser Abminderung der zulässigen Scherbeanspruchung seit 1992 in der entsprechenden Vornorm ENV 1993-1-1 zu EN 1993-1-8 enthalten.

DETAIL	DO	DON'T
TRANSVERSE CONNECTIONS & STIFFENERS.		
BEARING STIFFENERS & PLATES.		
CRUCIFORM DETAILS.		
SPLICES.		
LOCAL EXTENSIONS.		

**Bild 3.23.** Empfehlungen zur konstruktiven Gestaltung im Brückenbau [BCSA10b],  
© The British Constructional Steelwork Association Ltd.

**Figure 3.23.** Detailing DOs and DON'Ts in the design of steel bridges [BCSA10b],  
© The British Constructional Steelwork Association Ltd.



**Bild 3.24.** Gleitwiderstand bei kombinierter Scher- und Zugbeanspruchung

**Figure 3.24.** Slip resistance in combined shear and tension

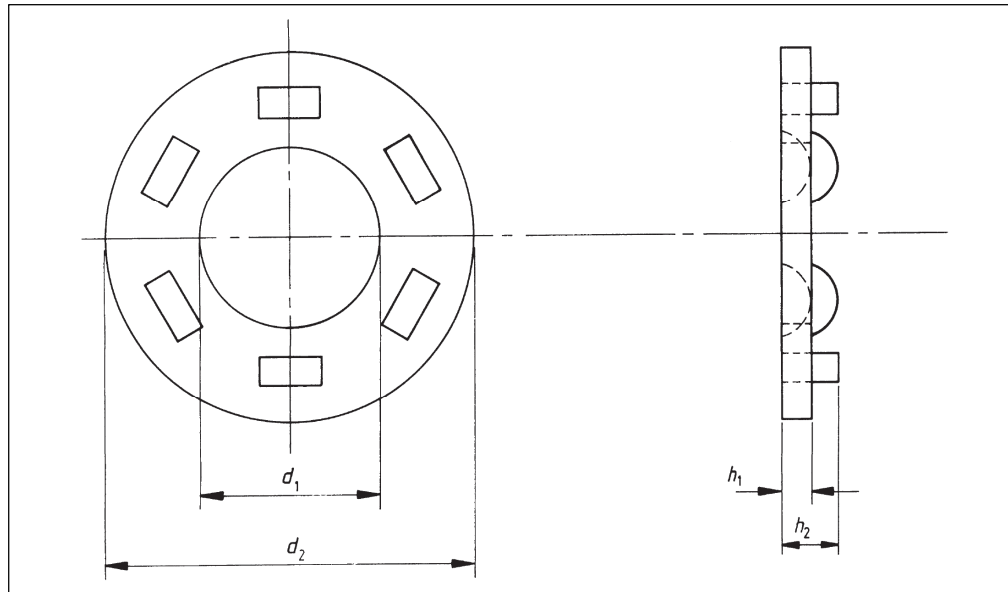
### 3.5.3 Prüfung und Anwendung

#### 3.5.3.1 Vormalige Regeln entsprechend BS 7644-1

Direkte Kraftanzeiger wurden erstmalig 1993 in BS 7644-1 genormt. Die gegebenenfalls erforderlichen Scheiben hoher Härte – vgl. Bilder 2.21 und 2.22 – sind in BS 7644-2 spezifiziert. Sowohl die direkten Kraftanzeiger als auch die mutterseitigen und schraubenkopfseitigen Scheiben waren für die Verwendung mit *HSFG*-Garnituren entsprechend BS 4395-1 und -2 vorgesehen. Dementsprechend wurde analog bei der Festigkeitsklasse zwischen *Grade 1 (General grade)* und *Grade 2 (Higher grade)* unterschieden.

Die Abmessungen wurden entsprechend Bild 3.25 hinsichtlich des Außendurchmessers  $d_2$ , des Innendurchmessers  $d_1$ , der Mindesthöhe  $h_1$  des scheibenförmigen Grundkörpers und der maximalen Gesamthöhe  $h_2$  einschließlich der Überstände spezifiziert. Es mussten mindestens vier Überstände vorhanden sein, die gleichmäßig über den Umfang verteilt sind und in radialer Richtung derart angeordnet sind, dass mit den gegebenen Toleranzen des Zusammenspiels mit der Garnitur und den Scheiben der Kontakt aller Überstände zur Gegenauflage sichergestellt ist. Erforderliche Abmessungen waren dazu im Detail nicht angegeben.

Die Anforderungen an die Mindesthöhe des Spaltes für die Festigkeitsklasse *Higher grade* wurden entsprechend beibehalten, siehe Tabelle 3.1, da die Eigen-



**Bild 3.25.** Abmessungen von direkten Kraftanzeigern entsprechend BS 7644-1

**Figure 3.25.** Dimensions of direct tension indicators according to BS 7644-1

schaften der HSFG-Garnituren ebenso Bestand hatten. Für die Festigkeitsklasse *General grade* war nur die zulässige Maximalhöhe des Spaltes definiert. Die Anwendungsregeln des Herstellers – vgl. Bild 3.2 – wurden somit übernommen; die Sonderregelung für feuerverzinkte geschleuderte Garnituren entfiel jedoch.

**Tabelle 3.1.** Mittlere Höhe der Spalte entsprechend BS 7644-1, Tabelle 3

**Table 3.1.** Average indicator gaps according to BS 7644-1, Table 3

Indicator position <sup>a</sup>	Dimensions in millimetres		
	Grade 1	Grade 2	
	Maximum average gap <sup>b</sup>	Maximum average gap <sup>b</sup>	Minimum average gap <sup>c</sup>
Under bolt head, when nut is rotated [Figure 2 a)] Under nut, when bolt is rotated [Figure 3 a)]	0.40	0.50	0.40
Under nut, when nut is rotated [Figure 2 b)] Under bolt head, when bolt is rotated [Figure 3 b)]	0.25	0.35	0.25
<sup>a</sup> Tests have shown the need for a smaller gap when the indicator is used under the rotating component. Indicators fitted as specified will result in the same loads being attained when the bolts are tightened to the specified gaps. <sup>b</sup> Maximum average gap: to achieve at least the minimum load in Table 2. <sup>c</sup> Minimum average gap: not to exceed maximum load in Table 2.			

## Prüfung

Die Prüfung des direkten Kraftanzeigers erfolgte durch einen Druckversuch, für den die zeitgleiche Messung der Druckkraft und des Spaltes zwischen den Überständen gefordert war. Dabei konnte die Messung des Spaltes entweder mit einer

Fühllehre oder einer Messuhr erfolgen. Weitere Vorgaben zum Prüfaufbau waren nicht gegeben.

Wie eine Messuhr bei der relativen Verschiebung zweier Druckplatten mit dazwischen liegendem direktem Kraftanzeiger auf null abzugleichen war, war nicht spezifiziert. Der Abgleich ist allerdings zwingende Voraussetzung, um die festgelegten Spalte entsprechend Tabelle 3.1 (erste Zeile) – z. B. 0,4 mm – detektieren zu können. Die dazu erforderliche Druckkraft musste innerhalb folgender Grenzen liegen:

für *Grade 1* zwischen der 1,0- und 1,2-fachen Mindestvorspannkraft  $P_0$ ,

für *Grade 2* zwischen der 0,85- und 1,15-fachen Mindestvorspannkraft  $P_0$ .

Die zulässige minimale und maximale Druckkraft für *Grade 1* zum Erreichen eines Spaltes von 0,4 mm wird heute weiterhin verwendet, siehe Tabelle 2.2. Diese Grenzen gelten nun in gleicher Relation für beide Festigkeitsklassen, 8.8 und 10.9.

Bei der Verwendung von Fühllehren konnten die vorgegebenen Drucklastniveaus angefahren werden, um dann manuell das mögliche Eindringen der Fühllehre zu überprüfen, genauso, wie es für die Anwendung vorgesehen war. Das gezielte Anfahren des definierten Spaltes war allerdings nur näherungsweise möglich, da die Anwendung der entsprechenden Fühllehre nur die Information *ist größer* oder *ist kleiner* liefern kann.

## Anwendung

Die Anordnung der mutter- oder schraubenkopfseitigen Scheibe wurde innerhalb der HSFG-Garnitur in Abhängigkeit von der gedrehten Komponente – Mutter oder Schraube – und der diesbezüglichen Position des direkten Kraftanzeigers geregelt. Die heutigen Montagekonfigurationen für Garnituren der Festigkeitsklasse 8.8, siehe Bilder 2.21 und 2.22, entsprechen den damaligen Festlegungen. Eine Unterscheidung zwischen den beiden Festigkeitsklassen gab es allerdings nicht. Eine schraubenkopfseitige Scheibe war dementsprechend in der Klasse *Grade 2* beim Anziehen durch Drehen der Mutter und Lage des DTI unter dem Schraubenkopf nicht erforderlich, vgl. Bild 2.20.

Als normale Montagekonfiguration wurde – und wird gemäß EN 1090-2, Anhang J – die Anordnung des DTI unter dem Schraubenkopf bei gedrehter Mutter bezeichnet, siehe Bild 2.21 (A). Sie ist technisch die zu bevorzugende Variante, da zum einen das übliche Drehen der geschmierten Mutter ein weniger großes Anziehmoment – im Gegensatz zum ungeschmierten Schraubenkopf – benötigt. Zum anderen wird das Abplatten der Überstände bei nicht drehendem Schrau-



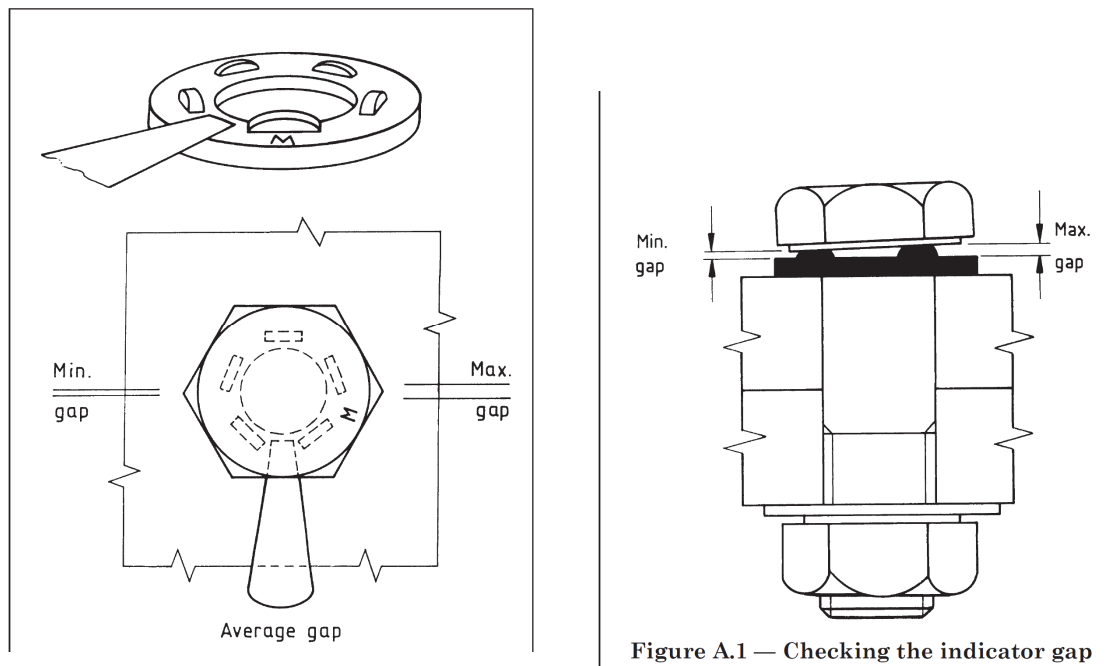
benkopf ausschließlich durch die Schraubenkraft als axiale Druckkraft verursacht. Ein tangenciales Abreiben bzw. Umformen der Überstände durch das direkte Drehen einer Komponente auf den Überständen wird durch aktives Gegenhalten der Schraube oder eine ausreichend große Reibung in der Kopfauflage verhindert.

Die Anordnung unter der gedrehten Mutter entsprechend Bild 2.22 (B) und Bild 2.18 wird als Alternative bei mangelndem Zugang zur Kontrolle am Schraubenkopf angeboten. Der Zugang müsste allerdings mindestens zum Einsetzen und eventuell auch zum Gegenhalten der Schraube vorhanden gewesen sein, so dass diese Montagekonfiguration in erster Linie Vorteile für den Monteur bei der Steuerung der beiden Anziehschritte hat, da er den direkten Kraftanzeiger selbst sehen kann.

Die Montagekonfiguration mit gedrehter Schraube und dem direkten Kraftanzeiger unter der fixierten Mutter entsprechend Bild 2.21 (C) wird zwar auch als mögliche Variante bei begrenztem Platz und Zugang zur Kontrolle vorgeschlagen. Sie ist allerdings in den seltensten Fällen erforderlich, da auf der „unzugänglichen“ Seite, auf der die Schraube nicht eingesetzt werden kann und das Anziehgerät keinen Platz findet, eventuell trotzdem ein Gegenhalten und in jedem Fall die Kontrolle – visuell und mit Fühllehre – erfolgen muss.

In solchen Fällen kommt wohl vielmehr die vierte Variante – DTI unter dem gedrehten Schraubenkopf – zum Einsatz, siehe Bild 2.22 (D). Nur die Mutter muss auf der unzugänglichen Seite so positioniert werden, dass die Schraube von offener Seite aus eingedreht werden kann. Wo ausreichender Platz für das Anziehgerät ist, da sollte auch die Kontrolle des Spaltes möglich sein. Das Gegenhalten der „unzugänglichen“ Mutter könnte durch den Einsatz von Impulsschrauben vermieden oder durch konstruktive Verdrehsicherungen, z. B. angeschweißte Lagerblöcke, verhindert werden.

Der Hinweis, dass der direkte Kraftanzeiger bei der Anwendung in der Garnitur nicht zwingend gleichmäßig zusammengedrückt wird, ist bedeutsam und praxisrelevant, sogar unter Laborbedingungen, siehe Bild 2.18 (b). In jedem Fall soll ein mittlerer Spalt durch die manuelle Überprüfung festgestellt werden, der mit den Anforderungen entsprechend Tabelle 3.1 zu vergleichen ist. Sind die Überstände ungleichmäßig zusammengedrückt, sollte entsprechend Bild 3.26 der mittlere Spalt ausfindig gemacht werden. Offensichtlich wird hierunter die *Mittelung des Spaltes* verstanden, die in diesem Wortlaut weiterhin in EN 1090-2, Kapitel 8.5.6 genannt und zugelassen wird.



**Bild 3.26.** Überprüfen des Spaltes des direkten Kraftanzeiger entsprechend BS 7644-1  
**Figure 3.26.** Checking the indicator gap according to BS 7644-1

In [Sc76] heißt es dazu aus dem Englischen übersetzt:

„Da die Schraube nie absolut zentrisch in der Unterlegscheibe sitzt und daher die Erhebungen auch nicht gleichmäßig zusammengedrückt werden, ist es angebracht, nach Augenschein die durchschnittliche Spaltbreite zu messen.“

Eine recht weitgefasste Definition des Messens hatte sich offenbar etabliert.

Das manuelle visuelle Auffinden des mittleren Spaltes – da womöglich nur eine Fühllehre einer Dicke verfügbar – bedurfte guter Zugänglichkeit und unterlag der subjektiven Einschätzung des Monteurs. Es ist daher leicht verständlich, dass in der tatsächlichen Ausführung die Überstände weitestgehend vollständig abgeplattet wurden und die Spalte damit geschlossen waren, so dass das Anlegen der Fühllehre vermieden werden konnte. Zulässig schien dies für die Festigkeitsklasse *Grade 1* gewesen zu sein, da keine Mindesthöhe des mittleren Spaltes vorgeschrieben war, wie sie es jedoch für *Grade 2* (10.9) der Fall war. Somit dürfte folgende Einschätzung zutreffend gewesen sein, vor allem, wenn keine Spalte mehr vorhanden waren:

„Gaps may be measured with a feeler gauge but, with a little practice, can be judged by eye with sufficient accuracy.“ [BP78], S. 22.

Diese Einschätzung wurde weiterhin 2004 geteilt [SCI04], S. 27.

Die bereits thematisierte Problematik, offene Spalte gegen eindringende Feuchtigkeit zu versiegeln, wurde auch im Regelwerk benannt. Zwei Anstriche mit stahlbautypischer Farbe sollten ausreichend sein, um die Spalte in der Regel zu verschließen. Eine Butyl-Kautschuk Dichtmasse war für besondere Anforderungen empfohlen, die allerdings erst nach Abschluss aller Kontrollen ausgeführt werden durfte.

### 3.5.3.2 Aktuelle Regeln entsprechend EN 14399-9

Direkte Kraftanzeiger sind heute zusammen mit den mutter- und schraubenkopfseitigen Scheiben entsprechend EN 14399-9 genormt. Die vorgeschriebenen Abmessungen der direkten Kraftanzeiger wurden gegenüber BS 7644-1 um den Tangentialdurchmesser  $d_3$  des Überstands, den Innendurchmesser  $d_4$  des Überstands und die Höhe  $h_3$  der Überstände erweitert, siehe Bild 3.27.

Der mittlere Innendurchmesser  $d_1$  wurde auf ein konstantes Maß von  $1,05d$  angepasst und die zulässige Toleranz verkleinert.

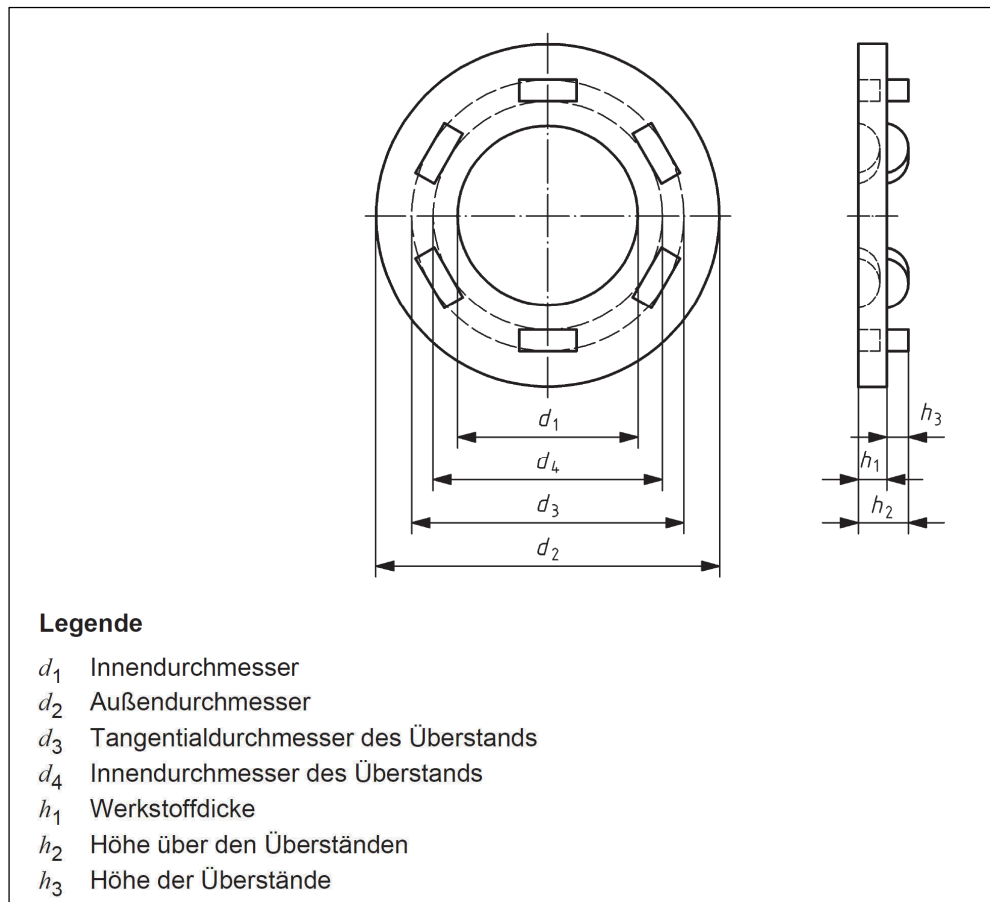
Der minimale Außendurchmesser  $d_2$  wurde vergrößert, unterliegt allerdings weiterhin keiner konstanten Proportion zum Nenndurchmesser  $d$ . Er liegt zwischen  $1,97d$  (M30) und  $2,19d$  (M16), allerdings in vermutlich beliebiger Verteilung.

Der maximale Außendurchmesser  $d_2$  wurde mit einer Ausnahme mit  $2,3d$  festgeschrieben; für M12 gilt  $2,7d$ . Damit wurde auch der Außendurchmesser  $d_2$  durchgehend vergrößert.

Die Höhe der Scheibe mit und ohne Überständen blieb unverändert, die Mindesthöhe  $h_3$  der Überstände wurde allerdings zusätzlich auf 0,8 mm festgelegt.

Die Mindestanzahl der gleichmäßig über den Umfang zu verteilenden Überstände beträgt weiterhin vier. Darüber hinaus ist die zu verwendende Anzahl nicht reglementiert. Die Formgebung des Überstandes obliegt im Rahmen der festgelegten Durchmesser und Höhen der Wahl des Herstellers.

Die zur Anzeige des Erreichens der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  zulässige größte Höhe beträgt – wie zuvor für *Grade 1* – 0,4 mm bzw. 0,25 mm, siehe Tabelle 2.6. Diese Maße gelten für beide Festigkeitsklassen, 8.8 und 10.9. Die vormals enge Eingrenzung für die Klasse *Higher Grade*, siehe Tabelle 3.1, konnte entfallen, da sämtliche Garnituren der Systeme HR und HV ausreichende Duktilität bei übermäßigem Anziehen nachweisen müssen, siehe Tabelle 2.2.



**Bild 3.27.** Maße des verformbaren scheibenförmigen direkten Kraftanzeigers entsprechend EN 14399-9

**Figure 3.27.** Dimensions of compressible washer-type direct tension indicator according to EN 14399-9

## Prüfung

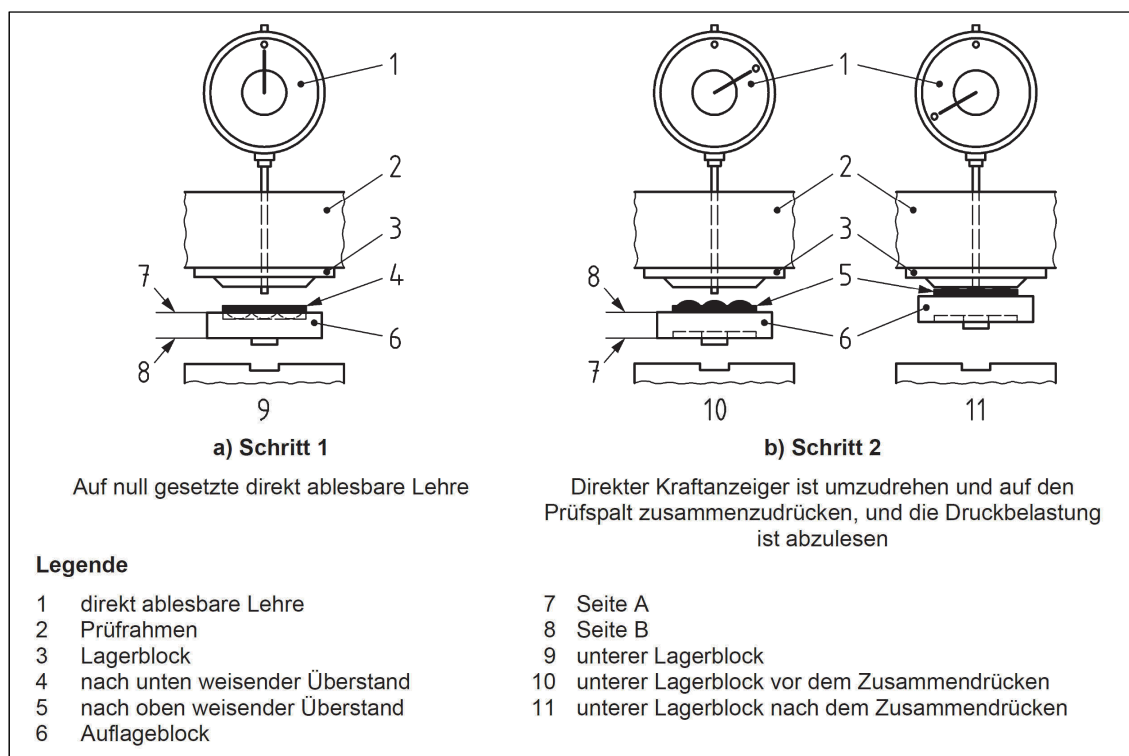
Die Prüfung des einzelnen direkten Kraftanzeigers hat nach einem detailliert festgelegten Prüfablauf unter Verwendung der zugehörigen Prüfeinrichtung entsprechend EN 14399-9 zu erfolgen. Darüber hinaus sind erstmalig die Anforderungen an die weiteren Gebrauchseigenschaften im Zusammenspiel mit der Schraubengarnitur sowie deren Nachweis durch Prüfungen festgelegt, siehe Tabelle 2.2.

Der Drucklastversuch umfasst zwei Schritte, siehe Bild 3.28. Im ersten Schritt erfolgt das Pressen des scheibenförmigen Grundkörpers des direkten Kraftanzeigers ohne die Überstände zu verformen, indem nur eine Kreisringfläche am äußeren Umfang des direkten Kraftanzeigers in Kontakt mit der Prüfeinrichtung ist. Eine direkt ablesbare Lehre bzw. Messuhr ist bei Erreichen der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  auf null abzugleichen.

Im zweiten Schritt werden die Überstände gestaucht. Bei einem Ablesewert der Lehre bzw. bei einem Spalt von 0,4 mm ist die zugehörige Drucklast zu protokollieren. Diese muss wie bereits nach BS 7644-1 zwischen der 1,0- und 1,2-fachen Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  liegen.

Die zeichnerische Darstellung des ersten Schrittes in Bild 3.28 ist unpräzise. Auch die schematische Darstellung sollte das tatsächlich vorgesehene ringförmige Aufliegen des DTI zeigen. Ferner muss hier der Eindruck entstehen, als ob die Überstände kopfüber Kontakt mit dem Auflageblock hätten. Dies ist durch die Tiefe der ringförmigen Nut im Auflageblock aber tatsächlich nicht möglich. In einer zukünftigen Ausgabe von EN 14399-9 sollte die zeichnerische Darstellung korrigiert werden.

Der Drucklastversuch wurde in der vorliegenden Form aus der nordamerikanischen Prüfnorm ASTM F606M, *Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally and Internally Threaded Fasteners, Washers, and Rivets (Metric)* übernommen. Erkenntnisse zum Ursprung dieser Prüfung sowie



**Bild 3.28.** Schritte zur Bestimmung der Druckbelastung im Drucklastversuch entsprechend EN 14399-9

**Figure 3.28.** Steps for determining the compression load in the compression test according to EN 14399-9

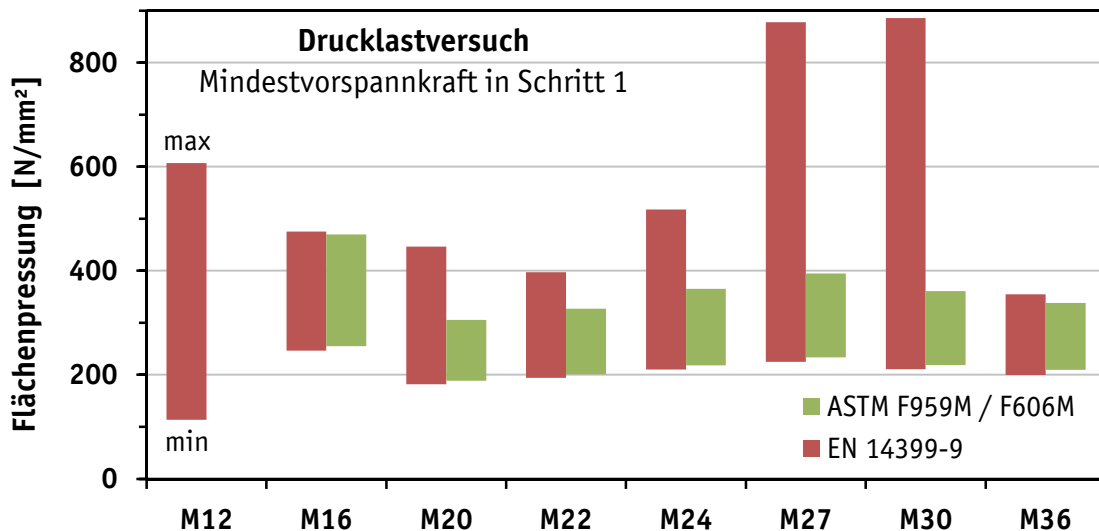
zu den Hintergründen liegen nicht vor. Aus [SNG99] geht hervor, dass der Drucklastversuch in seiner heutigen Form in ASTM F959-96 erstmalig enthalten war. Konsequenterweise erfolgte später der Übertrag in ASTM F606.

Die in BS 7644-1 alternativ mögliche Überprüfung des festgelegten Spaltes mit einer Fühllehre ist in der aktuellen Form nicht vorgesehen. Sie wäre unter Einhaltung der Vorgabe für die Geschwindigkeit der Versuchsdurchführung auch nicht möglich. Eine ausführliche Beschreibung der Prüfung des direkten Kraftanzeigers folgt im Rahmen der durchgeführten Versuche in Kapitel 4.3.

Die Aufnahme des Drucklastversuchs entsprechend ASTM F606/F606M in EN 14399-9 als standardisiertes Prüfverfahren für das Produkt DTI ist sinnvoll. Die zuvor gemäß BS 7644-1 gegebenen Möglichkeiten ließen einen großen Spielraum für die Ausführung der Prüfung.

Es ist jedoch zu bedenken, dass die Abmessungen der direkten Kraftanzeiger im Vergleich zu BS 7644-1 zwar weiterentwickelt wurden, diese allerdings nicht mit den Abmessungen nach ASTM F959M übereinstimmen. Unter Berücksichtigung der zulässigen Toleranzen für die Aufnahmevorrichtungen im geregelten Versuchsaufbau und den gegebenen zulässigen Abmessungen für den Außendurchmesser  $d_2$  können für die direkten Kraftanzeiger nach ASTM F959M und EN 14399-9 die resultierenden nominellen Flächenpressungen im ersten Schritt des Drucklastversuchs bestimmt werden. Hier bildet eine kreisringförmige Fläche am äußeren Umfang die Kontaktfläche zum Auflageblock, siehe Bild 3.28. Die Druckbelastung hat im ersten Schritt mit dem Erreichen der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  den maximalen Wert erreicht.

Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Mindestvorspannkraft für die Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9 ergeben sich mit den jeweils größtmöglichen und kleinstzulässigen kreisringförmigen Flächen die Spannweiten der Flächenpressungen entsprechend Bild 3.29. Es ist ersichtlich, dass die möglichen Flächenpressungen für DTI gemäß ASTM F959M auf einem vergleichsweise einheitlichen Niveau begrenzt sind. Für direkte Kraftanzeiger nach EN 14399-9 ergeben sich hingegen erheblich Abweichungen zu sehr viel größeren Flächenpressungen. Insbesondere bei den Nenndurchmessern M27 und M30 beträgt die Flächenpressung annähernd  $900 \text{ N/mm}^2$ . Es besteht die Befürchtung, dass die Ausnutzung dieser Spannweite der Flächenpressung nicht nur den Auflageblock der Versuchseinrichtung beschädigen kann, sondern der direkte Kraftanzeiger bereits im ersten Schritt plastisch verformt wird. Es ist zu hinterfragen, ob die nun bei höchster



**Bild 3.29.** Spannweite der Flächenpressung in Schritt 1 des Drucklastversuchs aufgrund der geometrischen Toleranzen nach EN 14399-9 und ASTM F959M/F606M

**Figure 3.29.** Range of contact pressure in step 1 of the compression test due to geometrical tolerances according to EN 14399-9 and ASTM F959M/F606M

Belastung abzugleichende Lehre einen geeigneten Nullpunkt für die Beurteilung der Höhe der Überstände bzw. des Spaltes bietet.

Die Ursache für die aus heutiger Sicht „viel zu kleinen“ Abmessungen der direkten Kraftanzeiger M27 und M30 steht vermutlich im Zusammenhang mit den nach BS 7644-1 und BS 4395-1 zu erzielenden Vorspannkräften für die Festigkeitsklasse *General grade*. Durch die verminderte Festigkeit ab dem Nenndurchmesser M27 und den bevorzugten Einsatz der Festigkeitsklasse *General grade* gegenüber der Klasse *Higher grade* (10.9) waren größere Abmessungen wohl nicht erforderlich. Wie es zu den vielfach günstigeren Flächenpressungen für DTI M36 infolge entsprechender Abmessungen gekommen ist, bleibt ungewiss.

Die Abmessungen der direkten Kraftanzeiger mit dem Nenndurchmesser M12 – die nach ASTM F959M nicht vorgesehen sind – sind ebenso hinsichtlich der Abmessungen anzupassen, so dass die Flächenpressungen sinnvoll begrenzt werden.

Ob die überaus hohen Flächenpressungen in der Praxis tatsächlich vorliegen, ist nicht festzustellen. Es wäre allerdings nachvollziehbar, wenn die Hersteller durch die Wahl eines kleinen Außendurchmessers Material einsparen würden. Die Vorgaben von EN 14399-9 für den Außendurchmesser  $d_2$  sollten in jedem Fall überprüft und angepasst werden, sofern der Drucklastversuch in der jetzigen Form bestehen bleibt.

## Anwendung

Die Regeln zur Verwendung von direkten Kraftanzeigern entsprechend EN 14399-9 und EN 1090-2 wurden bereits in Kapitel 2.5.4.5 erläutert. Ihre Anwendung erfolgt im Rahmen der später beschriebenen experimentellen Untersuchungen.

### 3.5.3.3 Aktuelle nordamerikanische Regeln

#### ***RCSC Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts [RCSC14]***

Die *RCSC Specifications* beinhalten die Regeln zur Berechnung und Bemessung, Installation und Kontrolle von geschraubten Verbindungen. Dementsprechend sind sie von anderen Regelwerken vielfach referenziert. Die verwendbaren Verbindungselemente, die in Nordamerika üblicherweise erst auf der Baustelle zu Garnituren zusammengestellt werden, sind anhand der relevanten Produktnormen vorgeschrieben. Derzeit sind nur zöllige Verbindungselemente und das amerikanische Einheitensystem berücksichtigt. Als Bemessungskonzepte werden gleichwertig sowohl das *Load and Resistance Factor Design (LRFD)* als auch das *Allowable Strength Design (ASD)* angeboten.

Die Einteilung der Verbindungsarten wird zum einen anhand der Vorspannung und teilweise ihrem Zweck wie folgt vorgenommen:

- „handfest“ angezogen: *Snug-Tightened Joints (ST)*,
- vorgespannt: *Pretensioned Joints (PT)*
- und gleitfest vorgespannt: *Slip-Critical Joints (SC)*.

Zum anderen werden die Verbindungen anhand der Grenzzustände der Beanspruchbarkeit bzw. der Beanspruchung unterschieden.

Das Vorspannen der Verbindungen erfolgt wahlweise mit

- dem Drehwinkelverfahren: *Turn-of-Nut Method*,
- dem Drehimpuls- oder Drehmomentverfahren: *Calibrated Wrench Method*,
- dem Verfahren mit HRC-Garnituren: *Twist-Off-Type Tension-Control Bolt Method*
- oder dem Verfahren mit direkten Kraftanzeigern: *Direct-Tension-Indicator Method*.



Für vorgespannte Verbindungen müssen vor der Montage auf der Baustelle mindestens drei Garnituren jeglicher Kombination von Durchmesser, Länge, Festigkeitsklasse und Los in einer Kalibriereinrichtung (*Tension Calibrator*) vorgespannt werden, so dass für das gewählte Anziehverfahren, die Anziehparameter und das Anziehgerät sichergestellt ist, dass die 1,05-fache Mindestvorspannkraft erreicht wird. So werden zudem die Monteure hinsichtlich der Einflüsse auf die Vorspannkraft sensibilisiert. Die sogenannte *Pre-Installation Verification* ist unabdingbar, da Garnituren aus den Komponenten unterschiedlicher Hersteller in der Regel erst auf der Baustelle zusammengestellt werden.

Direkte Kraftanzeiger dürfen anstelle einer – zumeist hydraulischen – Kalibriereinrichtung verwendet werden, um die Anziehverfahren, mit Ausnahme des Drehwinkelverfahrens, zu überprüfen. Bei kurzen Klemmlängen kann dies die einzige Möglichkeit zur Überprüfung sein.

Für die dazu verwendbaren direkten Kraftanzeiger muss für jedes Los (*Verification Lot*) der mittlere Spalt (*Calibrated Gap* bzw. „Prüf-Spalt“) zum Erreichen der 1,05-fachen Mindestvorspannkraft mit einer Genauigkeit von 0,001" (0,025 mm) bestimmt sein. Das zu prüfende Anziehverfahren ist an einer Garnitur einschließlich des „Prüf-DTI“ durchzuführen. Der mittlere Spalt des „Prüf-DTI“ muss nach Abschluss des Anziehens gleich oder kleiner als der „Prüf-Spalt“ sein. Für die *Calibrated Wrench Method* muss der „Prüf-DTI“ unter der nicht gedrehten Komponente angeordnet sein, für die *Tension-Control Bolt Method* unter dem Schraubenkopf, mit einer zusätzlichen gehärteten Scheibe dazwischen. Ist das Verfahren mit direkten Kraftanzeigern mit der „Prüf-DTI“ zu überprüfen, so ist der „Prüf-DTI“ an der gegenüberliegenden Seite zum zu prüfenden DTI anzuordnen.

Zum möglichen Einfluss der gedrehten Komponente auf dem „Prüf-DTI“ gibt es keine weiteren Bemerkungen. Ob eine Unterscheidung zwischen den Montagekonfigurationen bei der Bestimmung des *Calibrated Gap* der „Prüf-DTI“ vorzunehmen ist, wird nicht ausgeführt. Es ist allerdings naheliegend, entsprechend vorzugehen.

Über die tatsächliche Vorgehensweise zur Bestimmung des „Prüf-Spalt“ und über die Bewertung des Spalt nach dem Anziehversuch werden ebenso keine weiteren Angaben gemacht. Es wäre möglich, einzelne Fühllehren einer Palette an Fühllehren mit einer Abstufung von jeweils 0,001" in aufsteigender Reihenfolge der Dicke solange auszuprobieren, bis die geforderte Anzahl an Sperrweiten mit einer bestimmten Fühllehre festgestellt ist. Diese Fühllehre wäre dann für die Be-

wertung des mittleren Spaltes zu verwenden, um die Anzahl der Sperrweiten zu bestimmen.

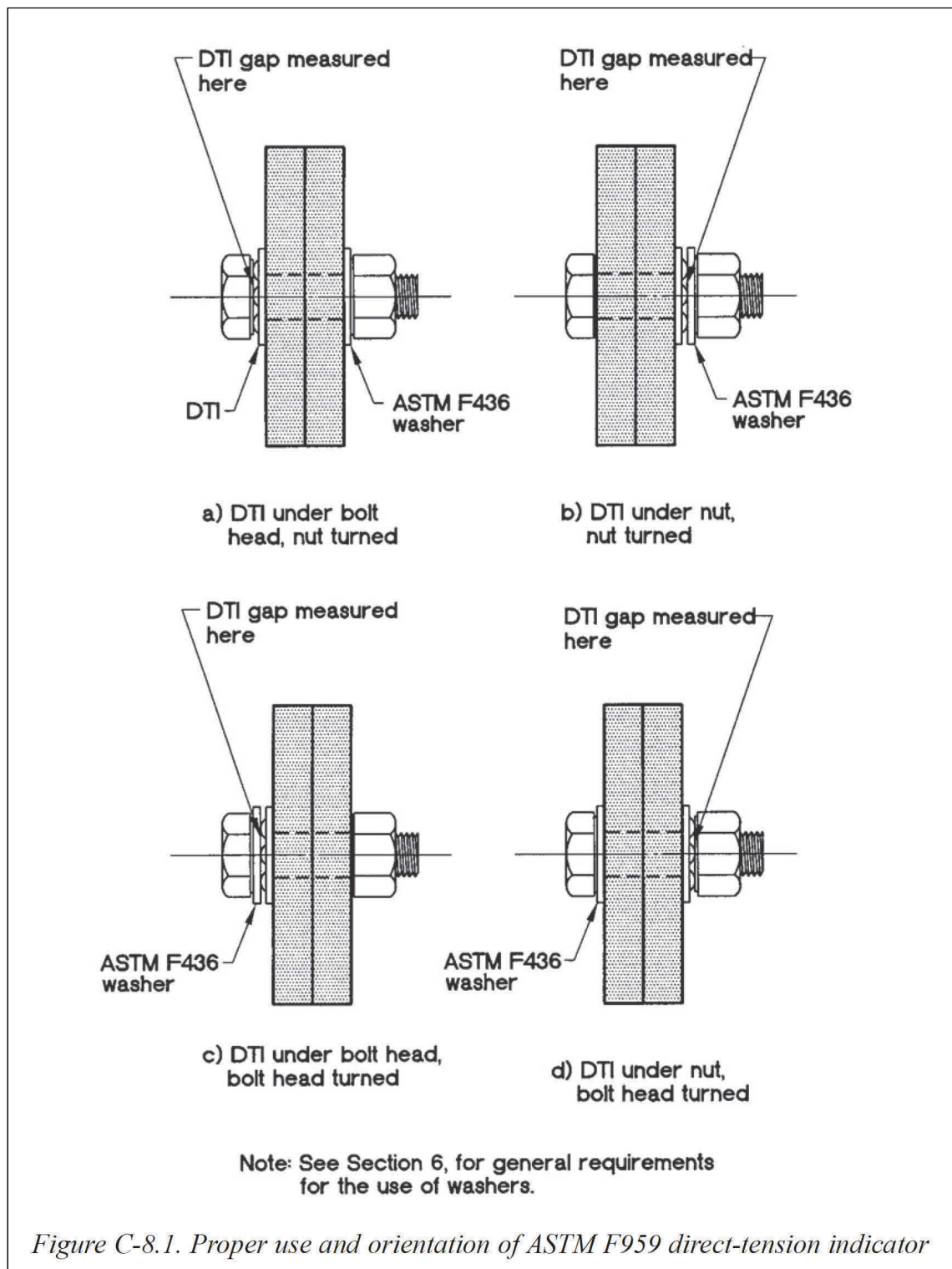
Der für die vorliegende Oberflächenausführung und Montagekonfiguration eines direkten Kraftanzeigers festgelegte mittlere Spalt (*Job Inspection Gap*), der das Erreichen der Mindestvorspannkraft anzeigt, ist entweder vom Hersteller angegeben und muss innerhalb der *Pre-Installation Verification* bestätigt werden, oder ist innerhalb der *Pre-Installation Verification* zu ermitteln. Die Anforderung an das Erreichen der 1,05-fachen Mindestvorspannkraft ist in ASTM F959, Anhang X1 geregelt. Die Angaben der Hersteller zu den anzuwendenden Fühllehren sind zumeist zusammen mit den allgemeinen Anforderungen an die Herstellung der vorgespannten Verbindung in komprimierter Form den DTI beigelegt.

Zur Ermittlung des *Job Inspection Gap* ist ebenfalls keine Vorgehensweise vorgegeben oder empfohlen. Ein Vorgehen analog zur Ermittlung des *Calibrated Gap*, wie zuvor beschrieben, wäre möglich.

Das Vorspannen mit direktem Kraftanzeiger ist in der Zusammenstellung der Garnitur entsprechend Bild 3.30 vorzunehmen. Zunächst erfolgt der erste Anziehschritt analog zum Vorgehen bei „handfest“ angezogenen Garnituren. Es ist sicherzustellen, dass der dabei entstandene mittlere Spalt nicht den Spalt zum Feststellen der Mindestvorspannkraft unterschreitet. Dies ist im Zweifel mit der Fühllehre zu kontrollieren. Nachdem alle Verbindungselemente für eine flächige Anlage der Bauteile sorgen, ist der zweite Anziehschritt bis zur Anzeige des Erreichens der Mindestvorspannkraft durchzuführen, und zwar vom Bereich größter Steifigkeit des Anschlusses ausgehend, so dass eine mögliche Entspannung benachbarter Schrauben möglichst gering ausfällt. Abschließend ist der Anziehvorgang zu überprüfen:

„*The installer shall verify that the direct tension indicator protrusions have been compressed to a gap that is less than the job inspection gap.*“ [RCSC14], S. 16.2-57.

Es ist kein grundsätzliches Verbot gegen das vollständige Schließen des Spaltes ausgesprochen. Das voranstehende Zitat lässt allerdings vermuten, dass der Verbleib eines Restspaltes geboten ist. Die Problemstellung und die Empfehlungen gemäß [SNG99], siehe Kapitel 3.3.2, bestätigen dies.



**Bild 3.30.** Montagekonfigurationen für DTI entsprechend [RCSC14]

**Figure 3.30.** Proper use an orientation of DTI according to [RCSC14]

### **AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications [AASHTO10]**

Für den Brückenbau ist ähnlich der *Pre-Installation Verification* eine erweiterte Prüfung auf der Baustelle erforderlich, der *Rotational-Capacity Test*. Neben der Überprüfung bzw. Kalibrierung des Anziehgerätes und -verfahrens, um die Mindestvorspannkraft zu erreichen, wird die Garnitur auf die Gebrauchseignung unter Berücksichtigung der Reibung hin untersucht. Die Fähigkeit der Monteure, das gewählte Verfahren sachgemäß auszuführen, wird dabei zusätzlich überprüft.

Jegliche Kombinationen der Lose von Schrauben, Muttern und Scheiben sind anhand von mindestens zwei Garnituren zu überprüfen und in Garniturenlose unter Zuordnung einer *Rotational-Capacity Lot Number* einzuordnen. Direkte Kraftanzeiger werden nicht berücksichtigt. Die Prüfung umfasst folgende Schritte:

- „handfestes“ Anziehen, mindestens bis 10 % der Mindestvorspannkraft,
- Positionsmarkierung an Schraubenende, Mutter und Kalibriervorrichtung anbringen,
- Anziehen bis zur Mindestvorspannkraft,
- Anziehdrehmoment messen, das erforderlich ist, um 5° weiterzudrehen, und den zugehörigen  $k$ -Faktor bestimmen,
- Anziehen fortsetzen, bis der gesamte Drehwinkel – von der Markierung aus gemessen – den folgenden Wert in Abhängigkeit von der Schraubenlänge  $l$  und dem Durchmesser  $d$  erreicht hat:

$l \leq 4d$	$4d < l \leq 8d$	$8d < l$
240°	360°	420°

- Messung der Vorspannkraft, die nach Abschluss des Weiterdrehens vorhanden ist.

Die Prüfung ist Bestanden, falls der  $k$ -Faktor 0,25 nicht überschreitet, der Weiterdrehwinkel erreicht wird und dort die Vorspannkraft über der 1,15-fachen Mindestvorspannkraft liegt sowie ein Abstreifen des Gewindes nicht auftritt.

Falls ein Kriterium nicht erfüllt ist, wird das Los zurückgewiesen. Die entsprechenden Garnituren dürfen allerdings gereinigt, neu geschmiert und erneut geprüft werden. Der ausgeführte Weiterdrehwinkel entspricht dem doppelten Drehwinkel, der für das Drehwinkelverfahren einzusetzen ist.

### **ASTM F959M – Standard Specification for Compressible-Washer-Type Direct Tension Indicators for Use With Structural Fasteners (Metric)**

Metrische direkte Kraftanzeiger sind mit den erforderlichen chemischen und mechanischen Eigenschaften in ASTM F959M genormt. Im Gegensatz zu den Produktnormen der Schrauben A325 und A490 sind hier die festgeschriebenen Abmessungen enthalten. Die erforderliche Anzahl von Überständen ist in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser vorgegeben. In EN 14399-9 gibt es eine solche Vorgabe nicht.

Für den Drucklastversuch wird der festgelegte Spalt teilweise vorgegeben, bei dem die zugehörige Druckkraft die vorgegebenen Grenzen einhalten muss, siehe Bild 3.31. Im Gegensatz zu EN 14399-9 ist den Herstellern bei der Festlegung des erforderlichen Spaltes bei vorhandenen Oberflächenüberzügen für die Festigkeitsklasse 10.9 keine Vorgabe gemacht. Nach EN 14399-9 ist grundsätzlich ein Spalt von 0,4 mm sowohl im Drucklastversuch als auch in den entsprechenden Montagekonfigurationen vorgegeben, siehe Tabelle 2.6.

Grundsätzlich ist dies akzeptabel, da die Hersteller in den Begleitdokumenten die anzuwendenden Fühllehren vorgeben – und diese auch beilegen – oder der erforderliche Spalt im Rahmen der *Pre-Installation Verification* auf der Baustelle festzulegen ist. Dazu heißt es wie folgt:

*„DTIs may be field tested in a bolt tension calibrator with bolts, nuts, and flat washers, according to the provisions of the Research Council on Structural Connections Specification for Structural Joints Using A325 or A490 Bolts to determine a job inspection gap. The job inspection gap shall be a gap less than the measured DTI test gap at  $1.05 \times$  the minimum required bolt tension.*

*Because bolt tension calibrators are “soft” devices, unlike hard steel connections, care should be taken to tension the bolts with a non-impacting wrench so the tension readings can be recorded exactly.“ [ASTM F959M]*

TABLE 2 Direct Tension Indicator Gap for Compression Load Testing			TABLE 3 Acceptable Range of Compression Loads		
Direct Tension Indicator Finish	Gap, mm		Direct Tension Indicator Size (Nominal Diameter, mm)	Compression Load Range, kN	
	Specification 8.8	Specification 10.9		Type 8.8	Type 10.9
Plain finish	0.4	0.4	M16	91–109	114–131
Mechanically galvanized	0.4	...	M 20	142–170	179–206
Baked epoxy coating on			M 22	176–211	221–254
Mechanically deposited zinc	0.4	...	M 24	205–246	257–296
			M 27	267–320	334–384
			M 30	326–391	408–469
			M 36	475–570	595–684

**Bild 3.31.** Anforderungen an den Drucklastversuch nach ASTM F959M

**Figure 3.31.** Requirements for the compression load test according to ASTM F959M

***ASTM F606M – Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally and Internally Threaded Fasteners, Washers, and Rivets (Metric)***

ASTM F606M enthält neben den Prüfungen für Schrauben, Muttern und Scheiben auch den Prüfablauf und die Versuchseinrichtung für den Drucklastversuch an direkten Kraftanzeigern. Die Versuchsdurchführung und die Abmessungen der Aufnahmevorrichtung sind identisch mit den Vorgaben in ASTM F606 für zöllige Abmessungen. Die Bewertung des Prüfergebnisses erfolgt nach ASTM F959M.

***ASME B18.2.6M – Metric Fasteners for Use in Structural Applications***

Die Abmessungen aller Komponenten von Sechskantgarnituren mit großer Schlüsselweite sind hier zusammengefasst. Dazu kommen die Verweise auf die Produktnormen mit den chemischen und mechanischen Eigenschaften sowie die erforderlichen Angaben zur Kennzeichnung und Bestellung. Damit kann die Norm als Referenz für die Beschaffung einzelner Komponenten oder vollständiger Garnituren genutzt werden.

***SAE J2486 – Tension Indicating Washer Tightening Method for Fasteners***

SAE J2486 wird im Anwendungsbereich des Fahrzeugbaus verwendet. Insbesondere für schwere Baumaschinen erfolgt eine Anwendung von direkten Kraftanzeigern. Neben der ursprünglichen Verwendung des DTI als Steuerungselement für das kontrollierte Vorspannen einer Verbindung werden weitere Einsatzmöglichkeiten als zusätzliches Kontrollelement dargelegt.

Die Verwendung zusammen mit dem Drehmomentverfahren ermöglicht eine zusätzliche Kontrolle der Vorspannkraft ohne besondere Einschränkungen. Für die ebenso benannten Drehwinkel- und kombinierten Verfahren ist der Einsatz als Kontrollelement nicht ohne weiteres möglich. Das stark veränderte Verformungsverhalten erfordert unter Einschluss eines DTI eine neue Festlegung des aufzubringenden Drehwinkels.

In Abhängigkeit der Anforderungen an die Verbindung werden unterschiedliche Kontrollanforderungen benannt, z. B. die Prüfung aller Verbindungselemente nach dem bekannten Vorgehen mit der Fühllehre oder die Prüfung anhand eines festgelegten Stichprobenumfangs.

#### 3.5.3.4 Gegenüberstellung

Die Betrachtung der vormaligen britischen und aktuellen nordamerikanischen Regelwerke für die Eigenschaften und die Prüfung des Produkts DTI zeigt, dass EN 14399-9 zusammen mit einigen zugehörigen Teilen in EN 1090-2 aus einer Mischung der britischen und nordamerikanischen Regelwerke hervorgegangen ist.

Die Prüfung des Produkts DTI erfolgt nun nach nordamerikanischem Vorbild im Drucklastversuch, dessen Gestaltung den heutigen prüftechnischen Möglichkeiten und Anforderungen an die Reproduzierbarkeit gerecht wird. Die Unterschiede in den geometrischen Abmessungen haben sich zwischen EN 14399-9 und ASTM F959M zwar verringert, der Einfluss der britischen Gestaltung entsprechend BS 7644-1 ist aber weiterhin unverkennbar. Dieser zeigt sich besonders in den stark schwankenden und teilweise übermäßig großen Flächenpressungen, die im Drucklastversuch auftreten können, besonders bei Einsparung von Material durch Reduzierung des Außendurchmessers.

Die vorgeschriebene Verwendung von mutter- und schraubenkopfseitigen Scheiben, die sich voneinander unterscheiden, folgt weiterhin dem Vorbild von BS 7644, wohingegen in Nordamerika nur ein Typ von gehärteter Scheibe sowohl unter dem Schraubenkopf als auch unter der Mutter genutzt wird.

In der Anwendung der Fühllehre zur Feststellung des ausreichenden Abplattens der Überstände wurde die nordamerikanische Variante übernommen. Gegenüber dem britischen visuellen – damit subjektiv beeinflussten – Auffinden des vermeintlich mittleren Spaltes und der dortigen Anwendung der Fühllehre ist nun die Prüfung aller Spalte vorgesehen, die bei Zurückweisung der Fühllehre an einem Spalt diesen als Sperrweite bewertet, die zu zählen ist. Ist die Anzahl der Sperrweiten größer als die Hälfte der vorhandenen Überstände bzw. Spalte, gilt der mittlere Spalt als ausreichend gering gegenüber der festgelegten höchstzulässigen Höhe des Spaltes.

Deutlichster Unterschied zwischen den Regeln zur Prüfung und Anwendung des direkten Kraftanzeigers in Europa und Nordamerika ist die zu verwendende Fühllehre bzw. die Dicke der Fühllehre. EN 14399-9 schreibt grundsätzlich vor, dass zwischen der Position der gedrehten Komponente bezogen auf die Lage des DTI zu unterscheiden ist. So sind festgelegte Fühllehren der Dicken 0,4 mm und 0,25 mm zu verwenden. Der direkte Kraftanzeiger muss geometrisch und werkstofflich derart beschaffen sein, dass die Kriterien des Drucklastversuchs (bei

0,4 mm) und der Anziehversuche mit DTI (bei 0,4 mm und 0,25 mm) erfüllt sind.

Nach ASTM F959M ist die Anforderung an den Spalt bzw. die Dicke der Fühllehre flexibler gehandhabt. Nur DTI der Festigkeitsklasse 8.8 (jeglicher Oberflächenausführung) und DTI der Klasse 10.9 in der Ausführung normal (wie hergestellt bzw. *plain*) müssen im Drucklastversuch bei einem Spalt von 0,4 mm beurteilt werden. Anderweitige Ausführungen sind nach Maßgabe des Herstellers zu beurteilen. Dazu muss der Hersteller in einer beiliegenden Gebrauchsanweisung die zu verwendenden Fühllehren für die unterschiedlichen Montagekonfigurationen mitteilen.

Die in Nordamerika obligatorische Kalibrierprüfung unter Baustellenbedingungen (*Pre-Installation Verification*) muss grundsätzlich an einer Stichprobe aller möglichen Garnituren durchgeführt werden, um das Erreichen der Mindestvorspannkraft durch Verwendung des Anziehverfahrens, der Anziehparameter und des Anziehwerkzeugs in Ausführung durch den Monteur nachzuweisen. Daher sind die Kenntnisnahme der individuellen Gebrauchsanweisung und das Erreichen der Mindestvorspannkraft sichergestellt. Alternativ kann an dieser Stelle die individuell zu verwendende Fühllehre über die Bestimmung des *Job Inspection Gap* festgelegt werden, der zum Erreichen der 1,05-fachen Mindestvorspannkraft erforderlich ist.

Die entsprechend EN 14399-9 oder EN 1090-2, Anhang H geprüften Garnituren mit DTI müssen hingegen nur das Erreichen der einfachen Mindestvorspannkraft vorweisen.

Es zeigen sich am Beispiel der Verwendung von direkten Kraftanzeigern die Unterschiede in den europäischen und nordamerikanischen Gepflogenheiten. Während in Europa die ausschließliche Verwendung von vollständigen Garnituren aus der Hand und in Verantwortung eines Herstellers vorgeschrieben ist, sind in Nordamerika der unabhängige Bezug der Komponenten und die Zusammenstellung zur Garnitur auf der Baustelle üblich. Hier erfolgt dann gegebenenfalls eine zusätzliche Behandlung mit Schmierstoffen, da deren Wirkung vor Ort geprüft und berücksichtigt wird. Gegenüber der traditionellen deutschen und europäischen Vorgehensweise mit dem Bezug werksseitig gezielt geschmierter Garnituren ist der Unterschied erheblich. Dementsprechend sind geeignete Kalibriereinrichtungen auf den Baustellen nicht vorhanden, um auch einen individuellen Spalt für den Einsatz von direkten Kraftanzeigern ermitteln zu können.



### 3.6 Ausblick auf Veränderungen

Im Rahmen der vorangegangenen Erläuterungen wurde deutlich, dass das vollständige Schließen der Spalte des direkten Kraftanzeigers nicht zugelassen ist, weder nach den nordamerikanischen, noch nach den aktuellen europäischen Regelwerken. Alle geregelten Anziehverfahren müssen nicht nur das Erreichen der Mindestvorspannkraft gewährleisten, sondern ebenso ein geeignetes „Abschaltkriterium“ gegen übermäßiges Anziehen besitzen. Für die direkten Kraftanzeiger ist dies zurzeit die Forderung nach einem Restspalt.

Auf Grundlage der nachfolgenden experimentellen Ergebnisse wird zu prüfen sein, ob das Bestehen eines Restspaltes ein hinreichendes Kriterium ist, um das übermäßige Anziehen zu verhindern.

Die ausführliche Bearbeitung der Problemstellung von SCHMECKPEPER ET AL. [SNG94], [SNG99] zeigte allerdings, dass die sorgfältige und aufwändige Erhaltung eines Restspaltes nicht immer ausgeführt wurde. Das Motto „lieber zu viel als zu wenig“ wird manchem Monteur geläufig sein.

Die den im Rahmen dieser Arbeit genutzten direkten Kraftanzeigern beiliegende Gebrauchsanweisung [Tu11] liefert den Hinweis auf eine britische Sonderregelung, die entsprechend der *National Structural Steelwork Specification for Building Construction / CE Marking Version* [BCSA10a] wie folgt lautet:

#### „6.3.3 Inspection during and after tightening

*Unless otherwise stated in the Project Specification, inspection shall comply with the requirements specified in BS EN 1090-2 for Execution Class 2. Unless prohibited by the Project Specification, the tightening of direct tension indicators to apparent full compression in more than 10% of cases shall not be a cause for rejection provided that the manufacturer's certificate of conformity confirms that is acceptable in terms of the specified suitability tests.“* [BCSA10a], S. 49.

Unter den genannten Umständen ist davon auszugehen, dass ein ausführendes Unternehmen großes Interesse an der Inanspruchnahme dieser Regel hat. Dementsprechend liefert der Hersteller folgenden Hinweis:

*„For TurnaSure® direct tension indicators the report from Rowan University in the USA on “Load – rotation tests of M24 x 90 HR 10.9 Galvanized Structural Bolt Assemblies with DTIs”, dated 29th October 2010 is considered to meet this requirement; copies of the report are available from TurnaSure LLC.“* [Tu11], S. 13.

Unabhängig vom Inhalt des zitierten Berichtes kann sicher nicht in Betracht gezogen werden, dass dieser Bericht als Gebrauchseignungsprüfung für sämtliche Lose, sämtlicher Durchmesser zu akzeptieren ist. Die Gebrauchsanweisung mit diesem Hinweis lag nicht etwa direkten Kraftanzeigern des Durchmessers M24 bei, sondern wird offensichtlich universell beigelegt.

Die Anforderungen an die Gebrauchseignungsprüfung zur Zulassung des vollständigen Schließens der Spalte des DTI werden im Anschluss an die nachfolgenden Untersuchungen erneut thematisiert.

Es ist davon auszugehen, dass die bisherige britische Sonderregel zum Zwecke größtmöglicher Legitimation und universeller Anwendbarkeit im Zuge der Weiterentwicklung von EN 1090-2 zur Diskussion und Aufnahme in das Regelwerk gestellt wird.

### 3.7 Zusammenfassung

Das Vorspannverfahren mit direkten Kraftanzeigern stammt aus Großbritannien. Es wurde zu einer Zeit entwickelt und verfügbar gemacht, als international der Stand des Wissens über gleitfest vorgespannte Schraubenverbindungen zur Übertragung von Scherbeanspruchungen maßgeblich erweitert wurde und die Anwendung dementsprechend erfolgte. Die vormaligen Regelwerke berücksichtigten die mögliche Zugbeanspruchung hochfester vorgespannter Schrauben aufgrund der geringeren Duktilität mit der gebotenen Vorsicht. Untersuchungen zu zugbeanspruchten Verbindungen wurden erst in der Fortsetzung zu den untersuchten scherbeanspruchten Verbindungen durchgeführt.

Im Verlauf unterschiedlicher Normengenerationen wurde die zulässige Zugbeanspruchung für vorgespannte Verbindungen erhöht. Die anfängliche Begrenzung auf die 0,6-fache Mindestvorspannkraft wurde zugunsten eines Nachweises der Tragsicherheit in Abhängigkeit von der Zugtragfähigkeit der Schraube abgelöst. Die Mindestvorspannkraft darf heute von der einwirkenden Zugkraft überschritten werden. Die tatsächliche Schraubenkraft – im Zusammenspiel von Vorspannkraft und einwirkender Zugkraft – bleibt dabei unberücksichtigt.

Die Anwendung des direkten Kraftanzeigers ist in Großbritannien im Hochbau wohl sehr verbreitet. Für den Brückenbau ist eine entsprechende Verbreitung in der vorliegenden Literatur nicht dokumentiert. Die Bedenken gegenüber der Anfälligkeit für Korrosion sind in den Regelwerken berücksichtigt. Direkte Kraftan-

zeiger aus wetterfesten Stählen dürfen nicht verwendet werden; verbleibende Spalte am direkten Kraftanzeiger müssen versiegelt werden.

Das eigens in Großbritannien für den Brückenbau entwickelte modifizierte kombinierte Verfahren (*part turn method*) zeigt, dass für die in Großbritannien nur in der *k*-Klasse K0 verfügbaren Garnituren eine Alternative zum Verfahren mit direkten Kraftanzeigern geschaffen werden musste. Es ist wohl das bevorzugte Verfahren im Brückenbau.

Unabhängig vom verwendeten Anziehverfahren empfehlen einschlägige Publikationen für den Brückenbau die Ausführung von scherbeanspruchten Verbindungen. Neben der Vermeidung unzulässiger und unangenehmer Fertigungs- und Montagetoleranzen bieten diese Verbindungen in gleitfest vorgespannter Ausführung eine sehr hohe Ermüdungsfestigkeit.

Beim Markteintritt des direkten Kraftanzeigers in Nordamerika waren die Bedenken gegenüber der Anfälligkeit für Korrosion und der erforderlichen Zeit zur Montage mit entsprechender Anwendung der Fühllehre gegenwärtig. Eine augenscheinliche Dynamik erlangte die Verbreitung und Verwendung des DTI erst mit dem Markteintritt eines zweiten Herstellers. Die patentierten Entwicklungen zur Reduzierung zusätzlicher Scheiben und zur Veranschaulichung des Anziehvorgangs durch den Austritt von farbigem Silikon haben zur Verbesserung und Beschleunigung der Handhabung beigetragen.

Der direkte Kraftanzeiger ist nicht nur als Anziehverfahren in den nordamerikanischen Regelwerken vertreten, sondern mittlerweile auch als Kalibrierinstrument, um andere Anziehverfahren oder das selbige Verfahren mit DTI vor der Ausführung in der obligatorischen Kalibrierprüfung unter Baustellenbedingungen (*Pre-Installation Verification*) zu überprüfen.

Die verfügbaren wissenschaftlichen Untersuchungen betreffen mit großem Anteil die vornehmlich dringendsten Problemstellungen: das zuverlässige Erreichen der Mindestvorspannkraft und die Folgen eines übermäßigen Anziehens durch vollständiges Schließen der Spalte bei scherbeanspruchten Verbindungen des Brückenbaus. Zugbeanspruchte Verbindungen werden in diesem Zusammenhang nicht erwähnt.

Die Auswirkungen einer Zugbeanspruchung auf die Verbindung mit DTI wurden ebenso wie der dauerhafte Erhalt der Mindestvorspannkraft jeweils nur in einem Beitrag untersucht. Für eine zugbeanspruchte T-Stummel-Verbindung wurden unter Berücksichtigung von Abstützkräften bei der Ausnutzung der da-

mals zulässigen Zugtragfähigkeit – der 0,6-fachen Mindestvorspannkraft – Vorspannkraftverluste von über 20 % ermittelt. Für eine Beanspruchung in Höhe der 0,8-fachen Mindestvorspannkraft waren es Vorspannkraftverluste von bis zu 40 %. Die insgesamt fragwürdigen Erklärungen und Vergleiche des Beitrags heben abschließend hervor, dass diese Vorspannkraftverluste immer noch geringer ausfallen, als diejenigen an gleichartigen Verbindungen ohne DTI, für die die Vorspannkraftverluste durch plastische Verformungen des Lochrandes entstanden, da keine gehärtete Scheibe vorhanden war. Entsprechende Untersuchungen an Verbindungen ohne DTI, aber mit gehärteter Scheibe, wurden nicht vorgestellt.

Kritische und fundierte Kommentare zur Verwendung von direkten Kraftanzeigern unter Berücksichtigung aller Aspekte sind nur von OWENS & CHEAL [OC89] sowie BERENBAK [BE12] auffindbar. Sie betreffen neben der Korrosion und dem Erreichen der Mindestvorspannkraft auch die Empfindlichkeit des Verfahrens beim Fügen der Bauteile und gleichmäßigem Vorspannen aller Elemente einer Gruppe sowie die Erhaltung der Vorspannkraft unter Zugbeanspruchung. Beide Beiträge müssen bedauerlicherweise ohne Beispiele aus experimentellen Untersuchungen auskommen.

Der Hersteller der im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten direkten Kraftanzeiger teilt die grundsätzlich zu berücksichtigende Wirkung von Zugbeanspruchungen für Schraubenverbindungen an mehreren Stellen, u. a. in der beiliegenden Gebrauchsanweisung, mit. Die in einer Produktbroschüre enthaltene detaillierte Vorgabe zur Begrenzung der einwirkenden Zugkraft auf die 0,6-fache Mindestvorspannkraft basiert vermutlich auf vormaligen Regelwerken. Die besonderen Eigenschaften des direkten Kraftanzeigers im Gegensatz zu gewöhnlichen vorgespannten Verbindungen werden allerdings nicht thematisiert.

Die britische Sonderregelung zur grundsätzlichen Zulassung des Schließens aller Spalte, verknüpft mit einem geeigneten Nachweis im Rahmen der Gebrauchseignungsprüfung, zeigt die mögliche Fortentwicklung der Regelwerke. Die derzeitigen Regeln zur Kontrolle und Rückweisung, d. h. zum Austausch von Garnituren, wären nur bei gesonderter projektspezifischer Vereinbarung einzuhalten. Dies steht auch im Gegensatz zu den nordamerikanischen Vorstellungen zum Nachweis gegen übermäßiges Anziehen.

### 3.8 Offene Fragen

Die dargelegten Entwicklungen der Regelwerke zur Bemessung und Berechnung sowie die vorhandenen Lücken bei der Untersuchung und Beschreibung des Tragverhaltens von zugbeanspruchten vorgespannten Verbindungen mit direkten Kraftanzeigern werfen folgende Fragen auf:

- Welche Auswirkungen hat die regelkonforme Zugbeanspruchung einer mittels direktem Kraftanzeiger vorgespannten Verbindung?
- Wie lassen sich gegebenenfalls Vorspannkraftverluste vermeiden oder begrenzen?

Die folgenden experimentellen Untersuchungen sollen zur Beantwortung dieser Fragen beitragen.



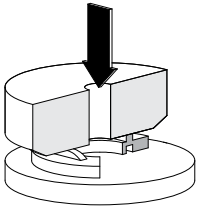
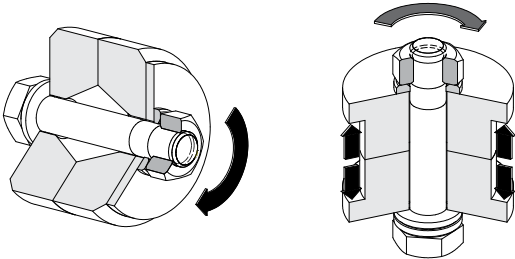
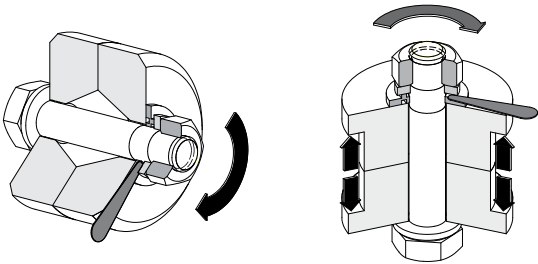
## 4 Experimentelle Untersuchungen zum Vorspannen mit direkten Kraftanzeigern

### 4.1 Versuchsprogramm

Die folgenden experimentellen Untersuchungen umfassen drei unterschiedliche Versuchsarten, den Drucklastversuch am direkten Kraftanzeiger, den Anziehversuch an einer Schraubengarnitur einschließlich DTI und den Bauteil-Zugversuch an vorgespannten Verbindungen, deren Montage mittels DTI erfolgte. Die schrittweise experimentelle Vorgehensweise ist in Bild 1.2 schematisch dargestellt. Tabelle 4.1 enthält die Zuordnung der betrachteten Prüfteile zu der jeweiligen Versuchsart.

**Tabelle 4.1.** Versuchsarten und zugehörige Prüfteile

**Table 4.1.** Test types and corresponding test specimens

Prüfteile	Prüfung/Versuch (Kapitel)		
	Drucklast (4.3)	Anziehen (4.4)	Zug (4.5)
Direkter Kraftanzeiger (DTI)			
Garnitur ohne DTI			
Garnitur mit DTI			

Der Drucklastversuch ist Bestandteil der Leistungsprüfung der direkten Kraftanzeiger entsprechend EN 14399-9 und ist dort als *Prüfverfahren für die Messung der Druckbelastung (alle Oberflächenausführungen) von direkten Kraftanzeigern* bezeichnet. Zu jeder Prüfung in einem festgelegten Versuchsaufbau und Versuchsablauf ist jeweils ein direkter Kraftanzeiger ohne weitere Komponenten der Schraubengarnitur heranzuziehen. Die Gebrauchseignung des DTI zur Anzeige der Mindestvorspannkraft wird zunächst über den Drucklastversuch nachgewiesen.

Der Anziehversuch an der Garnitur einschließlich direktem Kraftanzeiger ist sowohl für die Bewertung der Eignung der Garnitur als auch des direkten Kraftanzeigers im vorgesehenen Zusammenspiel der Komponenten entsprechend EN 14399-9 vorgesehen. Zur Versuchsdurchführung ist EN 14399-2 mit den Anforderungen an die Eignungsprüfung zu beachten. Die *Prüfung der Eignung zur Feststellung der Schraubenkraft* für den DTI erfolgt im Gegensatz zum Drucklastversuch unter gebrauchstüblichen Bedingungen wie der horizontalen Lage der Garnitur und dem Vorspannen durch Drehen einer Komponente einschließlich möglicher Schiefstellungen der inneren Auflageflächen. Mit der *Feststellung der Schraubenkraft* ist in der Regel die rein elastische Beanspruchung der Garnitur verbunden.

Die *Prüfung der Eignung zum Vorspannen mit direktem Kraftanzeiger in einer Garnitur* ist hingegen durch das weitergehende Anziehen mit erheblichen plastischen Verformungen, eventuell sogar bis zum Bruch der Garnitur, charakterisiert. Das Verhalten ist im Wesentlichen durch Schraube und Mutter bestimmt.

Der Bauteil-Zugversuch besteht zum einen aus der Montage der Schraubenverbindung durch das Anziehen mittels DTI und zum anderen aus der Zugbeanspruchung auf die Bauteile, die durch die vorgespannte Schraubengarnitur zusammengefügt sind. Derartige Versuche bilden zwangsläufig aufgrund der großen Anzahl möglicher Parameter und der umfangreichen Wertebereiche eine fokussierte Stichprobe. Genormte Prüfverfahren sind daher nicht verfügbar.

Im Rahmen des Anziehvorgangs kann die *Eignung zur Feststellung der Schraubenkraft* jedoch in Ergänzung zu den Anziehversuchen beurteilt werden. Der Zugversuch zeigt das Verhalten der vorgespannten Verbindung mit DTI unter äußerer Zugbeanspruchung, insbesondere die Beeinflussung der Vorspannkraft.



Das Versuchsprogramm ist zusammen mit den wesentlichen Versuchsparametern in Bild 4.1 dargestellt. Es werden direkte Kraftanzeiger sowie Garnituren aus Schraube, Mutter und gegebenenfalls flachen Scheiben der Nenndurchmesser M16 und M20 berücksichtigt. Die verwendbaren Festigkeitsklassen H8 (8.8) und H10 (10.9) der direkten Kraftanzeiger werden beide einbezogen, wobei diese in den experimentellen Untersuchungen ausschließlich mit HV-Garnituren kombiniert werden. Die *Prüfung der Eignung zum Vorspannen mit direktem Kraftanzeiger in einer Garnitur* ist somit mit dem DTI der Festigkeitsklasse H8 nicht durchführbar. Aufgrund der Fokussierung auf das Last-Verformung-Verhalten des DTI ist diese allerdings entbehrlich.

Die Differenzierung des Prüfablaufs des Drucklastversuchs zwischen einem regulären entsprechend EN 14399-9 und einem erweiterten Prüfablauf wird in Kapitel 4.3 erläutert. Die Anziehversuche und Bauteil-Zugversuche wurden in zwei verschiedenen Montagekonfigurationen der Garnitur mit DTI durchgeführt. Zum einen wurde der DTI auf der Seite des fixierten Schraubenkopfs angeordnet, wobei das Anziehen durch Drehen der Mutter erfolgte. Die Abkürzung *Shr.fix* steht für diese Montagekonfiguration. Zum anderen wurde der DTI auf der Seite

			Versuchsparameter						Anzahl
			Durchmesser	Festigkeits- klasse	Prüfablauf	Montage- konfiguration	Schmier- zustand	Direkter Kraftanzeiger	
Versuchsprogramm	Drucklast- versuch EN 14399-9	Dv	M20	H10	regulär erweitert				22
	Anzieh- versuch EN 14399-2/-9	Av	M16	H8		Shr.fix Mu.rot	K1 ungeschmiert	mit DTI ohne DTI	67
	Bauteil- Zugversuch	Zv							64

**Bild 4.1.** Versuchsprogramm und Versuchsparameter

**Figure 4.1.** Experimental programme and experimental parameters

der rotierten Mutter unter Berücksichtigung der mutterseitigen Scheibe angeordnet, abgekürzt mit *Mu.rot.* Die dritte und vierte Montagekonfiguration entsprechend EN 14399-9 bzw. Bild 2.20 mit dem Drehen der Schraube wurden aufgrund untergeordneter Bedeutung nicht berücksichtigt.

In den Anziehversuchen mit einheitlichen Komponenten der Festigkeitsklasse 10.9/10/H10 wurde der Schmierzustand der Mutter zwischen der werksseitigen Schmierung der HV-Mutter entsprechend *k*-Klasse K1 und einer ungeschmierten HV-Mutter als extremes Beispiel der *k*-Klasse K0 unterschieden. Die Muttern stammten aus derselben Fertigungscharge, wobei die ungeschmierten Muttern im ungleichmäßig leicht öligen Zustand nach dem Gewindeschneiden und ohne spezifischen Behandlungsschritt mit Schmiermittel belassen wurden. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Schmierungen wurden ebenso anhand von Garnituren ohne DTI untersucht. Die Ergebnisse sind in [SS12b] und [Mo13] verfügbar. In dieser Arbeit wird auf die wiederholte Darstellung verzichtet.

Die Bauteil-Zugversuche wurden zu Vergleichszwecken sowohl mit als auch ohne DTI durchgeführt. So können Einflüsse auf die Vorspannkraft in der Verbindung qualitativ und quantitativ auf einen direkten Kraftanzeiger zurückgeführt werden.

## 4.2 Prüfteile und Verbindungselemente

### 4.2.1 Prüfteile – Direkte Kraftanzeiger

Im Wesentlichen stellen die direkten Kraftanzeiger die Prüfteile dar, die je nach Versuchsart mit den weiteren Verbindungselementen zusammenwirken und von diesen beeinflusst werden. Die Bilder 4.2 bis 4.6 zeigen exemplarisch die direkten Kraftanzeiger von Vorder- und Rückseite, die für die Untersuchungen verwendet wurden. Die dementsprechend gleichartigen DTI werden im Folgenden als Serie bezeichnet bzw. angesprochen. Es handelt sich dabei um marktgängige direkte Kraftanzeiger, die von einem Händler bereitgestellt wurden. Diese sollten den Anforderungen von EN 14399-9 entsprechen. Da eine Anwendung des DTI mit einer HV-Garnitur beabsichtigt wurde, musste auf eine Lieferung im Garniturenlos verzichtet werden. Direkte Kraftanzeiger waren als Bestandteil einer HV-Garnitur mit dem obligatorischen CE-Kennzeichen nicht lieferbar.

Die Kennzeichnung der direkten Kraftanzeiger sowie deren Verpackung offenbarte unterschiedliche Angaben bezüglich der zugrunde liegenden Produktnorm. So deuteten die Markierungen des DTI mit „10.9“ auf die Produktnorm

ASTM F959M hin, die Verpackungen waren allerdings mit dem CE-Kennzeichen unter Angabe von EN 14399-9 beschriftet. Für DTI der Festigkeitsklasse H8/8.8 waren Markierung und Beschriftung hinsichtlich der Produktnorm genau andersherum vergeben. In Tabelle 4.2 sind die unterschiedlichen, widersprüchlichen Angaben zusammengestellt. Da die Durchführung des Drucklastversuchs nach EN 14399-9 und ASTM F959M identisch ist, könnte unter Einhaltung der leicht abweichenden Annahmekriterien sowie der unterschiedlichen geometrischen Anforderungen ein und derselbe DTI beiden Produktnormen entsprechen.

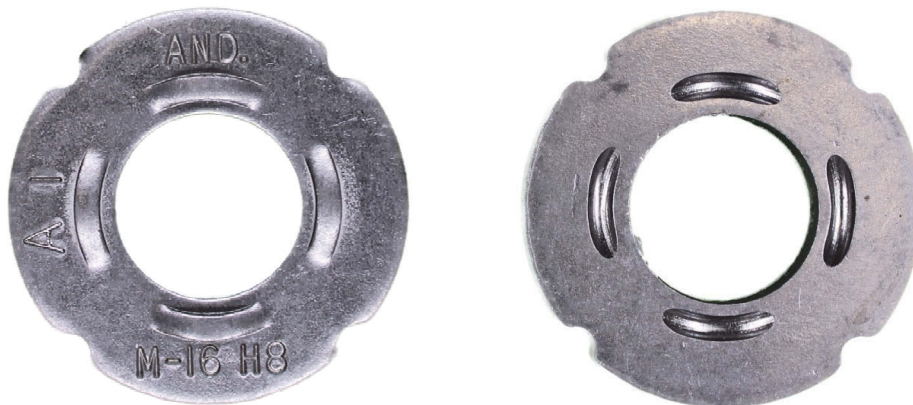
Die Angaben in den beiliegenden Abnahmeprüfzeugnissen 3.1 beziehen sich durchgehend auf ASTM F959M, wobei die Ergebnisse der chemischen Analyse sowie ein Wert für die Anzeigerdrucklast bei einem Spalt von 0,4mm aus dem Drucklastversuch enthalten sind. Die in den Prüfzeugnissen angegebenen Anzeigerdrucklasten sind neben den eigenen Ergebnissen in Tabelle 4.5 zusammengestellt.

Aufgrund der sehr ähnlichen Anforderungen an den direkten Kraftanzeiger entsprechend EN 14399-9 und ASTM F959M und der identischen Prüfung durch den Drucklastversuch wird den widersprüchlichen Kennzeichnungen keine weitere Beachtung zuteil. Es muss allerdings davon ausgegangen werden, dass die entsprechenden DTI zur Anwendung gelangten. Nach welchen Anwendungsregeln – EN oder ASTM – bleibt jedoch ungewiss. Für die nachfolgenden Untersuchungen werden die Anwendungsregeln entsprechend EN 14399-9 und EN 1090-2 berücksichtigt.

**Tabelle 4.2.** Angegebene Produktnormen der Prüfteile**Table 4.2.** Specified product standards of the test specimens

Prüfteile	Angegebene Produktnorm (Kennzeichnung)			
		Direkter Kraftanzeiger (Symbole)	Verpackung (Karton)	Abnahme- prüfzeugnis 3.1
M16	H8	EN 14399-9 (H8)	ASTM F959M	ASTM F959M
	H10	ASTM F959M (10.9)	EN 14399-9	k. A. <sup>a</sup>
M20	H8	EN 14399-9 (H8)	ASTM F959M	ASTM F959M
	H10	ASTM F959M (10.9)	EN 14399-9	ASTM F959M

<sup>a</sup> Abnahmeprüfzeugnis für die vorliegenden Lose nicht vorhanden

**Bild 4.2.** Direkter Kraftanzeiger M16 – H8 (8.8) – unbeschichtet – Los A1**Figure 4.2.** Direct tension indicator M16 – H8 (8.8) – uncoated – lot A1**Bild 4.3.** Direkter Kraftanzeiger M20 – H8 (8.8) – unbeschichtet – Los A2**Figure 4.3.** Direct tension indicator M20 – H8 (8.8) – uncoated – lot A2



**Bild 4.4.** Direkter Kraftanzeiger M16 - 10.9 (H10) - unbeschichtet - Los A10

**Figure 4.4.** Direct tension indicator M16 - 10.9 (H10) - uncoated - lot A10



**Bild 4.5.** Direkter Kraftanzeiger M16 - 10.9 (H10) - unbeschichtet - Los A11

**Figure 4.5.** Direct tension indicator M16 - 10.9 (H10) - uncoated - lot A11



**Bild 4.6.** Direkter Kraftanzeiger M20 - 10.9 (H10) - unbeschichtet - Los 22AA

**Figure 4.6.** Direct tension indicator M20 - 10.9 (H10) - uncoated - lot 22AA

Die Geometrie der vorliegenden direkten Kraftanzeiger wurde manuell mit einem digitalen Messschieber (Genauigkeit  $\pm 0,02$  mm, Ziffernschritt看wert 0,01 mm) von unterschiedlichen Personen ausgemessen. Der Mittelwert der jeweiligen Messwerte, der zugehörige Variationskoeffizient sowie der Stichprobenumfang sind in Tabelle 4.3 zusammengestellt. Die entsprechenden Abmessungen sind in Bild 4.7 dargestellt. Unter Vernachlässigung der Einflüsse der Messmethode wurde die Übereinstimmung mit den Anforderungen an die Geometrie entsprechend beider möglicher Produktnormen mit zwei Ausnahmen festgestellt.

Der Außendurchmesser  $d_2$  der Serie M20–H8 wurde zu etwa 40,8 mm bestimmt. Die deutliche Unterschreitung des nach ASTM F959M geforderten Mindestwertes von 44 mm lässt den Schluss zu, dass es sich entgegen der Kennzeichnungen auf der Verpackung und im Zeugnis nur um DTI nach EN 14399-9 handeln kann, wie es im Übrigen die Markierung „H8“ anzeigt.

Die Werkstoffdicke  $h_1$  der Serie M16–H10 beträgt in etwa 3,2 mm. Damit liegt die Dicke deutlich unterhalb der Mindestdicke von 3,6 mm entsprechend ASTM F959M für die Festigkeitsklasse 10.9. Entgegen der Markierung dürfte es sich wie auf der Verpackung angegeben um Produkte entsprechend EN 14399-9 handeln.

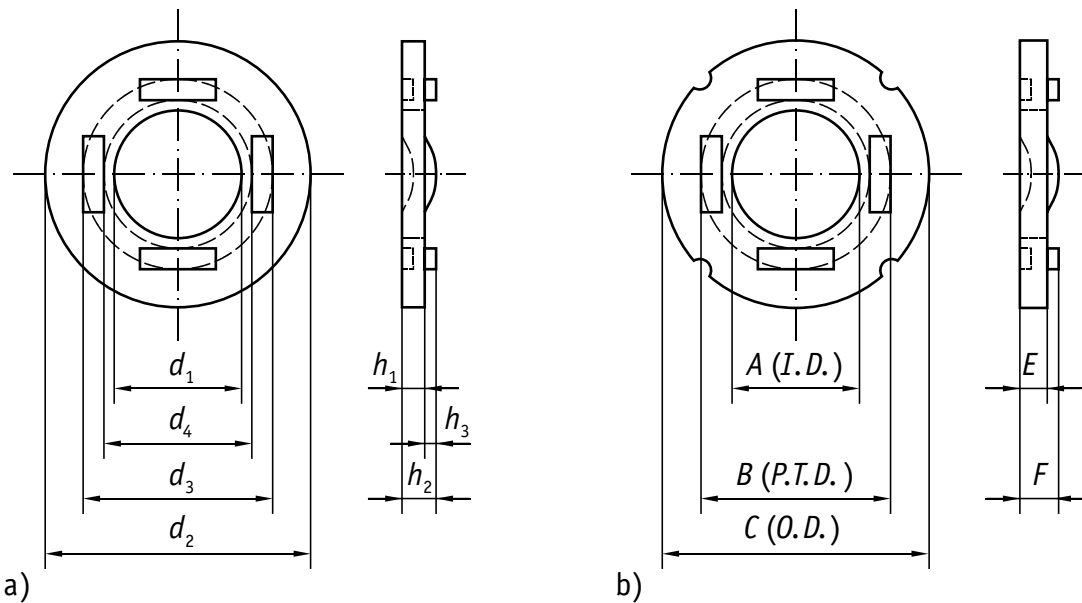
**Tabelle 4.3.** Maße der direkten Kraftanzeiger (Mittelwerte)

**Table 4.3.** Dimensions of the direct tension indicators (mean values)

			$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$h_1$	$h_2$	$h_3^a$
<b>M16</b>	H8 AND–A1	mean	16,9	36,5	24,2	19,7	3,2	4,4	1,20
		V	0,3%	0,1%	0,2%	0,2%	0,9%	0,7%	
		n	120	60	60	60	240	120	
	H10 TS–A10	mean	17,0	36,5	24,4	19,7	3,2	4,4	1,26
		V	0,4%	0,2%	0,1%	0,3%	1,3%	0,5%	
		n	96	48	48	48	192	96	
	H10 TS–A11	mean	16,9	36,3	24,4	19,7	3,2	4,9	1,72
		V	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%	0,7%	1,1%	
		n	60	30	30	30	120	60	
<b>M20</b>	H8 AND–A2	mean	21,0	40,8	28,8	23,7	3,8	5,2	1,46
		V	0,1%	0,1%	0,7%	0,8%	1,0%	0,7%	
		n	115	115	115	115	230	115	
	H10 TS–22AA	mean	21,1	44,9	28,9	23,9	4,0	5,3	1,36
		V	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,4%	0,5%	
		n	36	18	18	18	72	36	

Mittelwert *mean* [mm], Variationskoeffizient *V* [%], Stichprobenumfang *n* [–]

<sup>a</sup> Die Höhe der Überstände  $h_3$  wurde als Differenz aus den Mittelwerten der Höhen  $h_1$  und  $h_2$  bestimmt.



**Bild 4.7.** Maße von direkten Kraftanzeigern entsprechend EN 14399-9 (a) und ASTM F959M/ASME B18.2.6M (b)

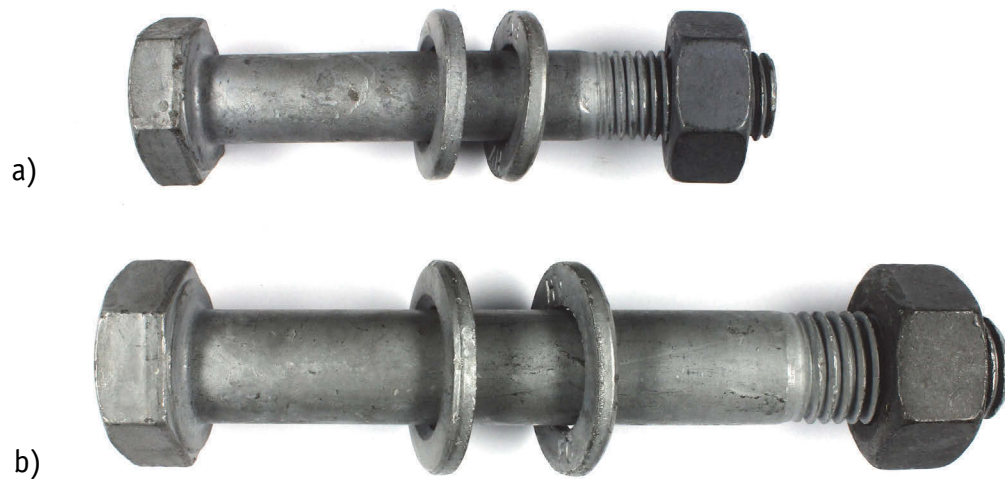
**Figure 4.7.** Dimensions of direct tension indicators according to EN 14399-9 (a) and ASTM F959M/ASME B18.2.6M (b)

#### 4.2.2 Weitere Verbindungselemente

Aufgrund der neuartigen Kombinationsmöglichkeiten unterschiedlicher Komponenten entsprechend EN 14399 wurden ausschließlich HV-Garnituren verwendet, um erste Erfahrungen mit dem zusätzlichen Einsatz von direkten Kraftanzeigern zu gewinnen, da diese in Deutschland weitestgehend unbekannt sind.

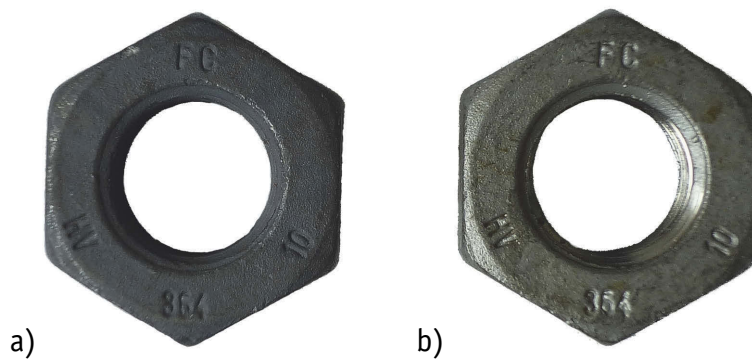
Für die Anziehversuche wurden feuerverzinkte HV-Garnituren entsprechend Bild 4.8 verwendet. Die unterschiedlichen Schmierzustände der Muttern sind in den Bildern 4.9 und 4.10 sichtbar. Die werksseitige Schmierung der Mutter mit  $\text{MoS}_2$ -haltigem Schmierstoff ist als dunkle, fest anhaftende Beschichtung gegeben. Damit ist eine definierte Schmierung entsprechend  $k$ -Klasse K1 vorhanden. Der leichte Ölfilm, der der Mutter ohne besondere Behandlung nach dem Schneiden des Gewindes anhaftet, ist zum einen ungleichmäßig auf der einzelnen Mutter wie auch auf dem gesamten Los verteilt und zum anderen nicht dauerhaft gleichmäßig anhaftend. Ohne die genauen Eigenschaften dieser geringfügigen Schmierung zu kennen, wird diese der  $k$ -Klasse K0 zugeordnet. Die sonstigen Eigenschaften der Muttern aus dem gemeinsamen Herstellungslos sind identisch, da die Schmierung als abschließender Prozessschritt durchgeführt wird.





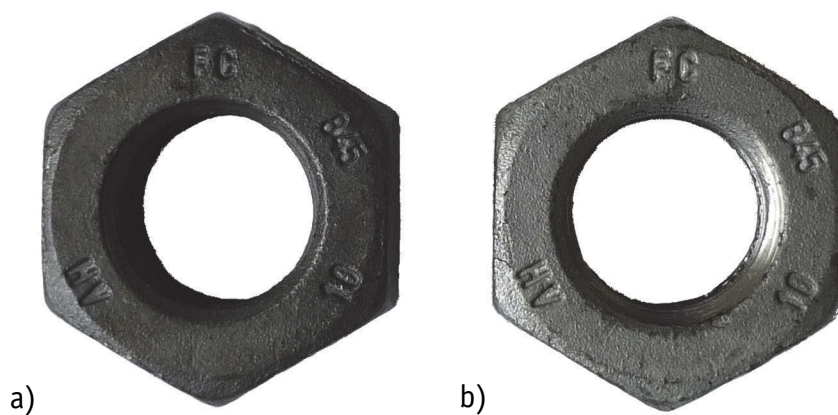
**Bild 4.8.** Garnitur Schraube/Mutter EN 14399-4 - HV - 10.9/10 - tZn - K1, M16 × 100 (a), M20 × 140 (b)

**Figure 4.8.** Bolt/nut assembly EN 14399-4 - HV - 10.9/10 - tZn - K1, M16 × 100 (a), M20 × 140 (b)



**Bild 4.9.** Mutter EN 14399-4 - HV - M16 - 10 - tZn, k-Klasse K1 (a) und K0 (b)

**Figure 4.9.** Nut EN 14399-4 - HV - M16 - 10 - tZn, k-class K1 (a) and K0 (b)



**Bild 4.10.** Mutter EN 14399-4 - HV - M20 - 10 - tZn, k-Klasse K1 (a) und K0 (b)

**Figure 4.10.** Nut EN 14399-4 - HV - M20 - 10 - tZn, k-class K1 (a) and K0 (b)



Soweit möglich wurden die flachen gefasteten Scheiben nach EN 14399-6 als Bestandteil der gelieferten HV-Garnitur verwendet. Die zur Anwendung des DTI entsprechend Bild 2.20 erforderlichen mutterseitigen Scheiben entsprechend EN 14399-9 wurden aufgrund mangelnder Verfügbarkeit für die Anziehversuche eigens hergestellt, für die Zugversuche konnten marktübliche Scheiben mit Markierung „HN“ verwendet werden.

Die schraubenkopfseitigen Scheiben entsprechend EN 14399-9 sind geometrisch mit den flachen gefasteten Scheiben nach EN 14399-6 identisch. Es wurden daher blanke gefaste Scheiben verwendet, die mit einer entsprechend höheren Härte ausgestattet wurden. Einziger Unterschied war die ursprüngliche Markierung „HV“ anstelle der vorgesehenen Markierung „HB“.

Für die Bauteil-Zugversuche wurden feuerverzinkte HV-Schrauben jeweils mit einem Dehnungsmessstreifen (DMS) instrumentiert, so dass die Schraubenkraft überwacht und aufgezeichnet werden konnte. Diese Schrauben, und auch die zugehörigen HV-Muttern, wurden aufgrund der aufwändigen Herstellung und Kalibrierung mehrfach wiederverwendet. Weitere Details zu den im Zugversuch verwendeten Schrauben sind im entsprechenden Kapitel 4.5 dargestellt.

## 4.3 Drucklastversuche an direkten Kraftanzeigern

### 4.3.1 Allgemeines

Die elementare mechanische Eigenschaft des direkten Kraftanzeigers ist das Last-Verformung-Verhalten unter axialer Druckbeanspruchung. Die Prüfung dieser Eigenschaft muss entsprechend EN 14399-9 *„durch den Hersteller im Anschluss an den abschließenden Fertigungsprozess einschließlich der Oberflächenbehandlung“* durchgeführt werden. Dazu beschreibt und verordnet EN 14399-9 ein Prüfverfahren, das die sogenannte *Leistungsprüfung der direkten Kraftanzeiger* darstellt. Die genaue Bezeichnung des Verfahrens lautet *„Prüfverfahren für die Messung der Druckbelastung (alle Oberflächenausführungen) von direkten Kraftanzeigern“*. Es wird hier komprimiert als *Drucklastversuch* benannt. Das Prüfverfahren ist identisch mit dem Verfahren nach ASTM F606M.

### 4.3.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der Drucklastversuch kann üblicherweise mit Hilfe einer Universalprüfmaschine durchgeführt werden. Hierzu wurde eine servohydraulische Zug-Druck-Prüfmaschine (Nennlast  $\pm 600$  kN) des Instituts für Metall- und Leichtbau der Univer-

sität Duisburg-Essen verwendet. Zwischen den vorhandenen Druckplatten wurde der spezifische Versuchsaufbau des Drucklastversuchs angeordnet, siehe Bild 4.11.

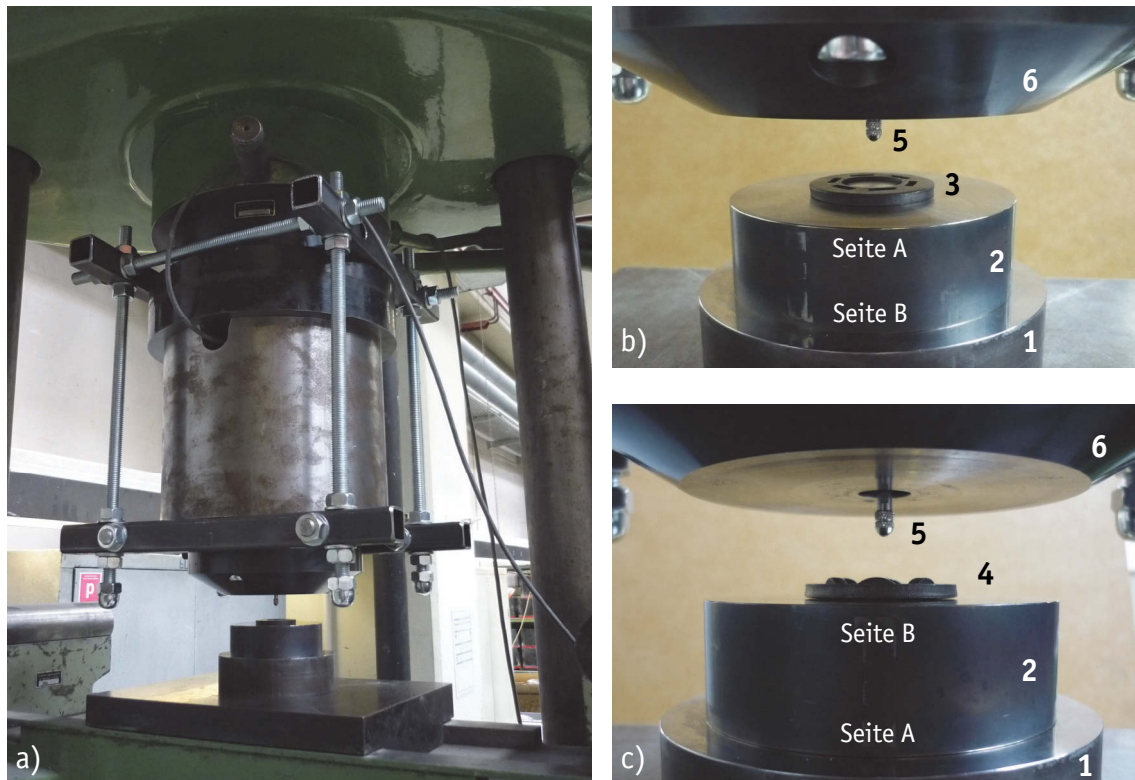
Der untere Lagerblock (1) ist an der Seite die nach oben weist mit einer Bohrung versehen, die die zylindrischen Überstände des Auflageblocks (2) mit geringem Spiel aufnimmt. Eine Zentrierung ist damit gegeben. Auf den Auflageblock wird der direkte Kraftanzeiger aufgelegt. Der untere Lagerblock (1) ist mit zwei unterschiedlichen Bohrungen, einer je Seite, ausgeführt, so dass je eine Seite für einen Nenndurchmesser verwendbar ist. Der Auflageblock (2) muss für jeden Nenndurchmesser individuell vorgehalten und eingesetzt werden. Die Maße sind in EN 14399-9, Tabelle 5 vorgegeben.

Der auf dem Auflageblock (2) liegende direkte Kraftanzeiger (3, 4) wird im Kontakt mit dem oberen Lagerblock (6) auf Druck beansprucht. Der obere Lagerblock verfügt über ein zentrisches Durchgangsloch, durch das ein induktiver Wegaufnehmer mit Tastspitze (5) hindurchgeführt wurde. Der Wegaufnehmer war an der oberen Seite des oberen Lagerblocks fixiert und erfüllt die Aufgabe der erforderlichen *direkt ablesbaren Lehre*. Um die Gehäuselänge und den Kabelanschluss des Wegaufnehmers zwischen den Druckplatten der Prüfmaschine unterzubringen, wurde ein stählerner Zylinder hängend an der oberen Druckplatte befestigt. Der obere Lagerblock ist mit dem Zylinder verschraubt.

Der Drucklastversuch umfasst zwei Schritte. Im ersten Schritt erfolgt das Pressen des scheibenförmigen Grundkörpers des DTI ohne die Überstände zu verformen. Dazu ist der Auflageblock mit der Seite A nach oben eingelegt, die über eine Ringnut verfügt. Der DTI wird mit den Überständen nach unten aufgelegt, so dass die Überstände ohne Kontakt in die Ringnut hinein hängen, siehe Bild 4.11 (b) und Bild 4.12 (a). Der DTI liegt mit einer äußeren kreisringförmigen Fläche auf dem Auflageblock auf. Beim Erreichen der Drucklast in Höhe der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  erfolgt im Schritt 1 das je Prüfung individuelle Abgleichen der Lehre, siehe Bild 4.13, indem die Lehre, d.h. der Wegaufnehmer, an diesem Punkt auf null gesetzt wird. Die Oberfläche des belasteten scheibenförmigen Grundkörpers bildet somit den Nullpunkt. Auf diese Weise werden herstellungsbedingte Schwankungen der Geometrie, z.B. der Dicke oder Ebenheit, ausgeglichen. Der Anzeigewert der Lehre stellt fortlaufend die Höhe der Überstände bzw. des Spaltes  $h_{\text{gap}}$  dar.

Im zweiten Schritt werden die Überstände gestaucht. Nach dem Entlasten aus Schritt 1 und dem Öffnen der Prüfvorrichtung ist der Auflageblock zu drehen und mit der Seite B nach oben einzulegen, siehe Bild 4.11 (c) und Bild 4.12 (b). Auf die ebene Oberfläche wird der DTI mit den Überständen nach oben aufgelegt. Das Aufbringen der Druckbelastung sorgt für das Abplatten der Überstände, siehe Bild 4.13. Der Drucklastversuch ist abgeschlossen, sobald ein Spalt von 0,4 mm erreicht ist. Die zugehörige Druckkraft, hier mit  $F_{0,4}$  mangels normativen Symbols bezeichnet, ist das Ergebnis des Drucklastversuchs. Sie wird auch als Anzeigerdrucklast bezeichnet. Für eine positive Bewertung des Ergebnisses muss die Druckkraft  $F_{0,4}$  zwischen 1,0 und 1,2  $F_{p,c}$  liegen, vgl. Tabelle 2.2. Der Spalt von 0,4 mm muss im Schritt 2 innerhalb von 30 Sekunden erreicht werden. Der Verlauf der Spalt-Druckkraft-Kurven, siehe exemplarisch Bild 4.13, wird für das reguläre Prüfverfahren nach EN 14399-9 nicht benötigt.

Um die Verformungseigenschaften der direkten Kraftanzeiger beurteilen zu können, wurden die vollständigen Spalt-Druckkraft-Kurven aufgezeichnet. Darüber hinaus wurde der reguläre Prüfablauf verlängert, so dass das vollständige Abplatten der Überstände erreicht wurde, siehe Bild 4.12 (c) und Bild 4.14. Die erforderliche Druckkraft zum Schließen der Spalte ist daraus bestimmbar. Diese Erweiterung des regulären Prüfablaufs ist mit dem Prüfverfahren nach EN 14399-9 vereinbar.



- |   |  |   |   |
|---|--|---|---|
| 1 | unterer Lagerblock                       | 5 | Tastspitze der direkt ablesbaren Lehre (Wegaufnehmer) |
| 2 | Auflageblock                             | 6 | oberer Lagerblock                                     |
| 3 | DTI mit nach unten weisenden Überständen |   |   |
| 4 | DTI mit nach oben weisenden Überständen  |   |   |

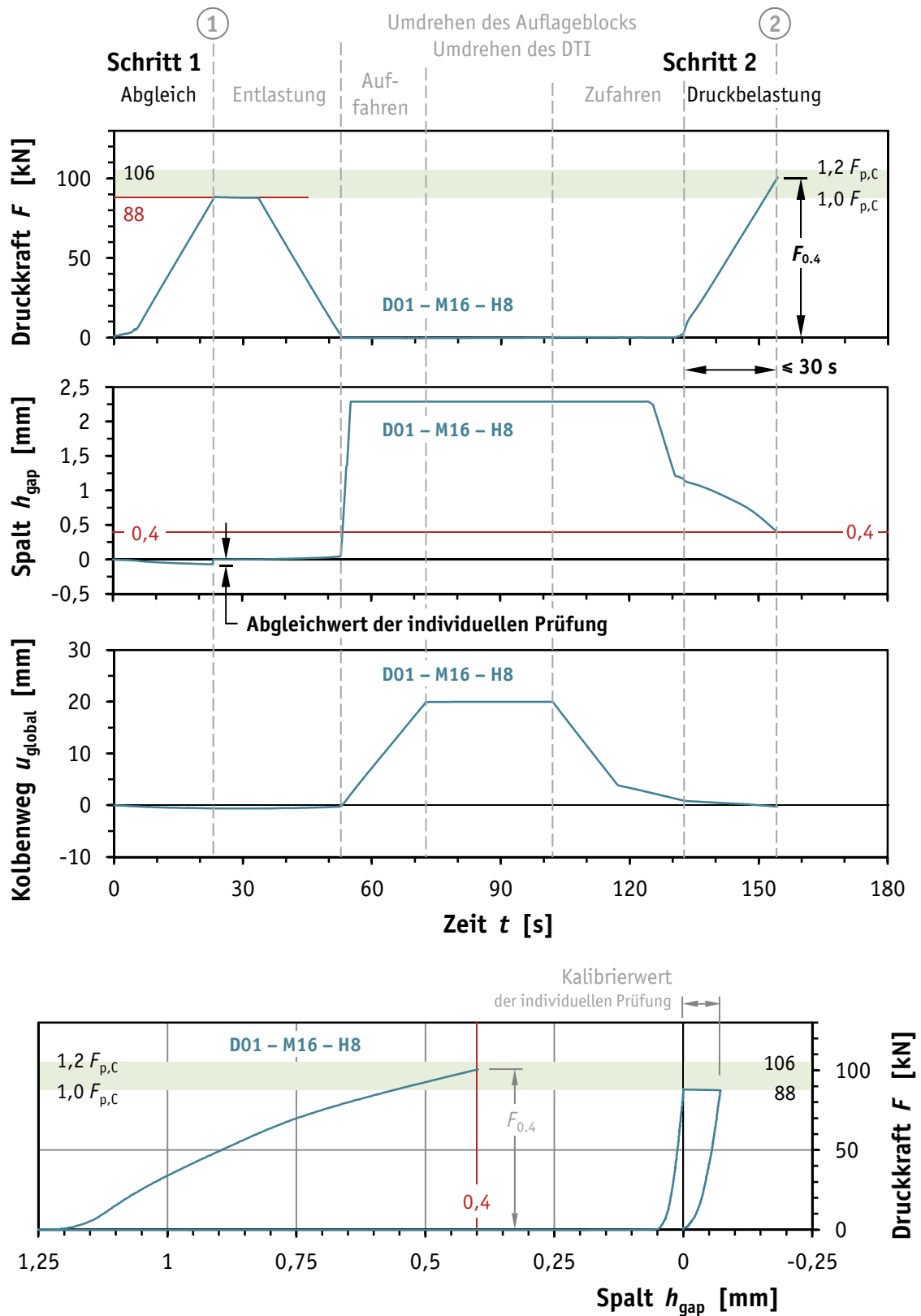
**Bild 4.11.** Versuchsaufbau für Drucklastversuche in einer universellen Druckprüfmaschine, Druckbelastungssystem mit Lager- und Auflageblöcken (a), Anordnung für Schritt 1 (b) und Schritt 2 (c), nach [SS14]

**Figure 4.11.** Test set-up for compression tests in an universal testing machine, compression loading system including bearing and support blocks (a), arrangement for Step 1 (b) and Step 2 (c), according to [SS14]



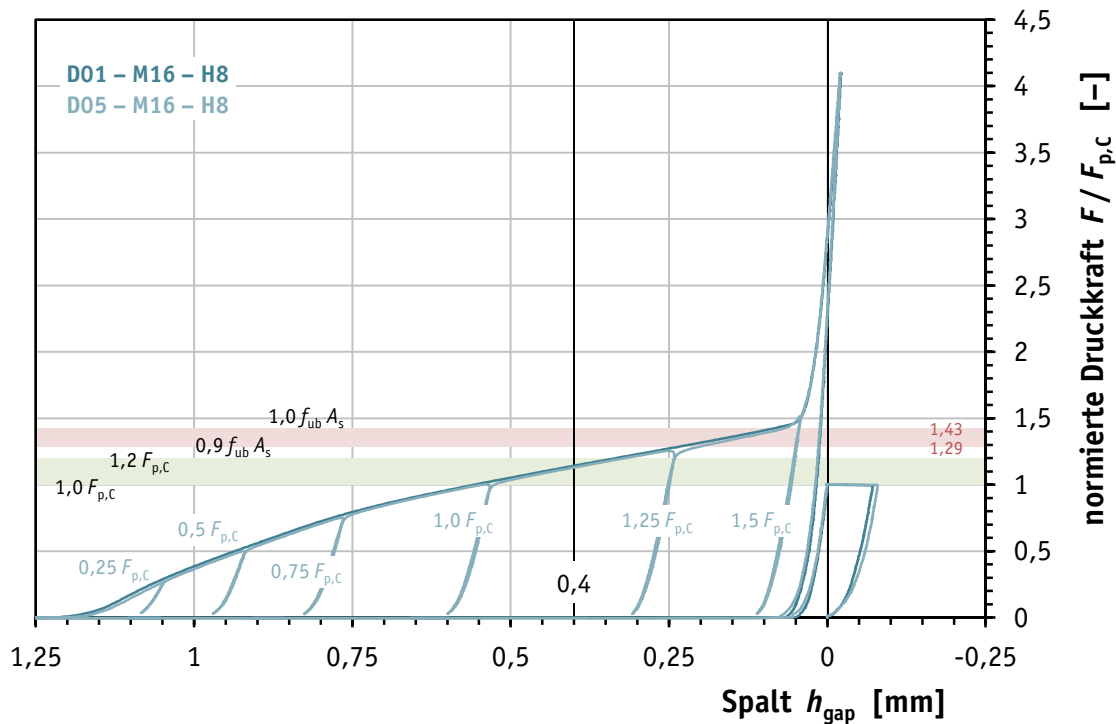
**Bild 4.12.** DTI im Drucklastversuch vor Schritt 1 (a), vor Schritt 2 (b) und nach erweiterter Prüfablauf (c), exemplarisch Prüfung Nr. D05 (M16 – H8)

**Figure 4.12.** DTI in the compression test prior to Step 1 (a), prior to Step 2 (b) and after the extended test sequence (c), exemplary for the test No. D05 (M16 – H8)



**Bild 4.13.** Prüfablauf des Drucklastversuchs entsprechend EN 14399-9, exemplarisch für Prüfung Nr. D01 (M16 - H8)

**Figure 4.13.** Test sequence of the compression test according to EN 14399-9, exemplary for the test No. D01 (M16 - H8)

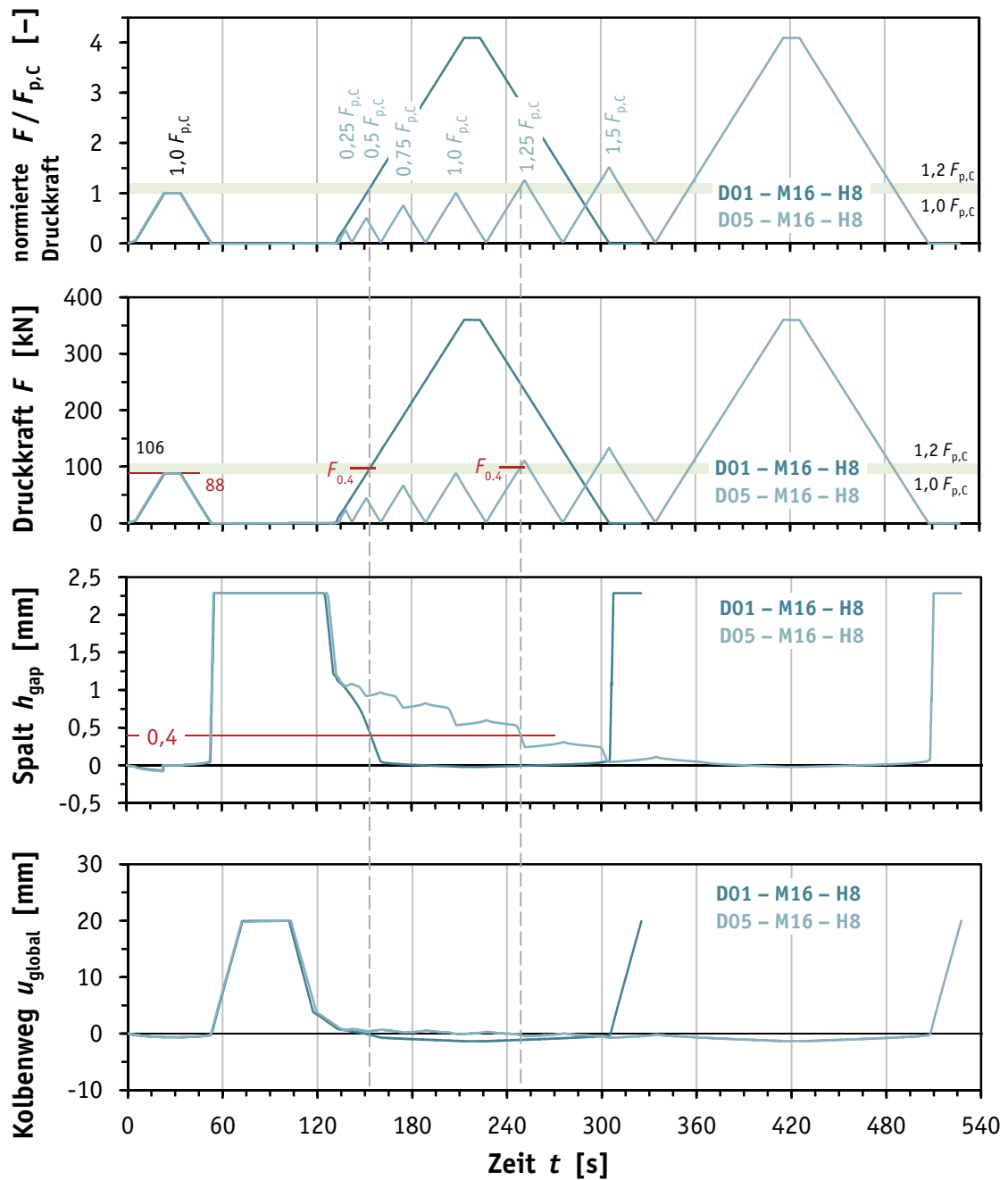


**Bild 4.14.** Spalt-Druckkraft-Diagramm für den erweiterten Prüfablauf der Drucklastprüfung, exemplarisch für die Prüfungen Nr. D01 und D05 (M16 – H8)

**Figure 4.14.** Gap-compression load-diagram of the extended test sequence of the compression test, exemplary for the tests No. D01 and D05 (M16 – H8)

Zusätzlich wurden weitere Prüfungen mit einer schrittweisen Be- und Entlastung vor und nach dem Erreichen des Spaltes von 0,4 mm durchgeführt, siehe Bild 4.14. Die insgesamt sechs Laststufen wurden in Inkrementen von  $0,25 F_{p,c}$  gesteigert, wobei zwischenzeitlich jeweils eine vollständige Entlastung durchgeführt wurde, siehe Bild 4.15. Obwohl diese Höhe und Anzahl von Lastwechseln keine praktische Bedeutung bei der Ausführung hat, so werden damit doch zwischenzeitliche Entlastungen einzelner Schraubengarnituren innerhalb des mehrschrittigen Anziehens von Schraubengruppen auf der sicheren Seite abgebildet. Die Kurvenabschnitte der Ent- und Wiederbelastung zeigen die Steifigkeit bzw. Nachgiebigkeit des DTI mit teilweise gestauchten Überständen, siehe Bild 4.14.

Dieser Prüfablauf entspricht nicht den Vorgaben des Prüfverfahrens nach EN 14399-9. Die maximale Dauer von 30 Sekunden zum Erreichen des Spaltes von 0,4 mm ist damit nur schwerlich einzuhalten, wobei aber eine zwischenzeitliche Entlastung innerhalb von Schritt 2 nicht explizit ausgeschlossen ist.



**Bild 4.15.** Erweiterter Prüfablauf des Drucklastversuchs, exemplarisch für die Prüfungen Nr. D01 und D05 (M16 – H8)

**Figure 4.15.** Extended test sequence of the compression test, exemplary for the tests No. D01 and D05 (M16 – H8)

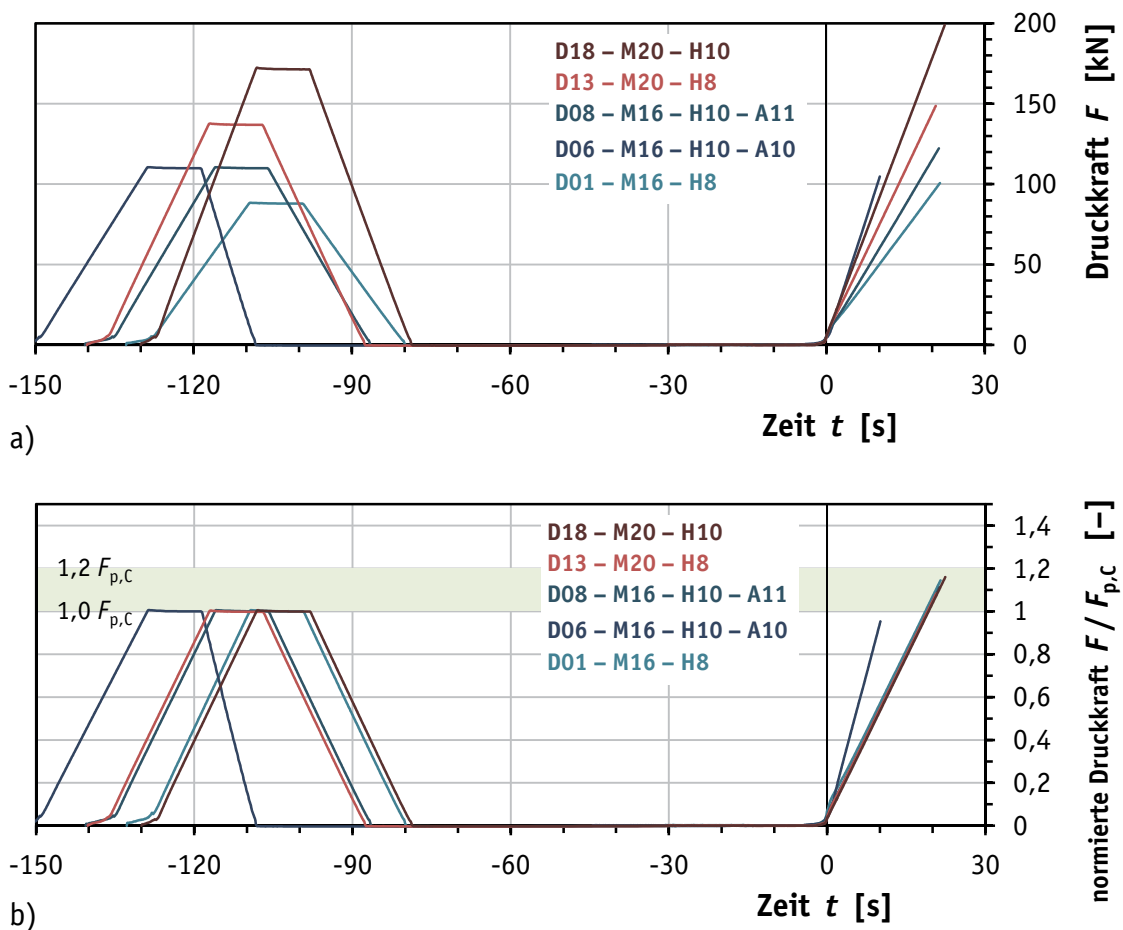
### 4.3.3 Versuchsergebnisse und Bewertung

#### 4.3.3.1 Regulärer Prüfablauf nach EN 14399-9

Die Drucklastversuche mit dem regulären Prüfablauf entsprechend EN 14399-9 sind exemplarisch mit einer Prüfung je Serie in den folgenden Bildern dargestellt. Bild 4.16 zeigt die Zeit-Druckkraft-Kurven sowohl im absoluten als auch im normierten Maßstab. Die Belastungsgeschwindigkeit  $v_F$  der Proben wurde in der Regel in Abhängigkeit der zugehörigen Mindestvorspannkraft  $F_{p,C}$  einheitlich entsprechend Gleichung (4.1) festgelegt, siehe Bild 4.16 (b).

$$v_F = \frac{1,5 \cdot F_{p,C}}{30 \text{ s}} \quad (4.1)$$

Somit ist gewährleistet, dass ein Spalt von 0,4 mm unter Druckbelastung innerhalb von 30 Sekunden im Zielfenster der erforderlichen Druckkraft erreicht wer-



**Bild 4.16.** Zeit-Druckkraft-Diagramme, exemplarisch eine Prüfung je Serie, (a) absolute Druckkraft, (b) normierte Druckkraft

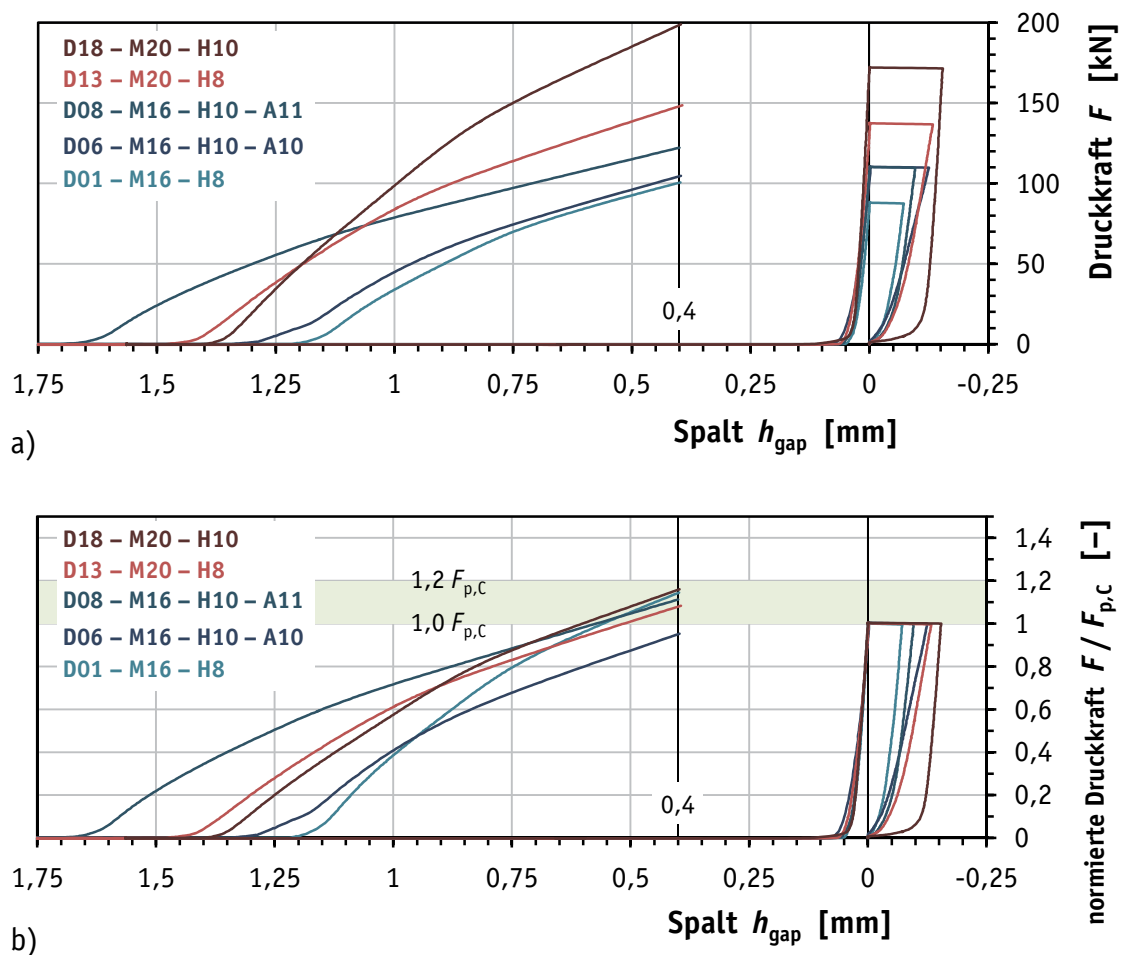
**Figure 4.16.** Time-compression load-diagrams, exemplary one test per series, (a) absolute compression load, (b) normalised compression load



den kann. Für die Prüfungen der Serie M16–H10–Los A10 (Nr. D06 und D07) wurde hiervon abgewichen. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde mit 10 kN/s etwa doppelt so hoch angesetzt.

Die Spalt-Druckkraft-Kurven sind in Bild 4.17 exemplarisch mit einer Prüfung je Serie dargestellt. Es ist unmittelbar ersichtlich, dass Prüfkörper D06 bei einem Spalt von 0,4 mm nicht die erforderliche Druckkraft erreicht hat. Sie liegt unterhalb der Mindestvorspannkraft  $F_{p,C}$ , womit die Anforderung nach EN 14399-9 nicht erfüllt ist. Für einen praktischen Gebrauch besteht die Gefahr – trotz zufriedenstellendem Einsatz der Fühllehre – unbemerkt eine nicht ausreichend hohe Vorspannkraft in der Verbindung zu erzielen. Die übrigen Prüfkörper erfüllen die Anforderung, siehe Bild 4.17 (b).

Die höhere Belastungsgeschwindigkeit des Prüfkörpers D06 sollte für die zu geringe Druckkraft  $F_{0,4}$  nicht ursächlich sein. Es liegen zwar keine vergleichenden



**Bild 4.17.** Spalt-Druckkraft-Diagramme, exemplarisch eine Prüfung je Serie, (a) absolute Druckkraft, (b) normierte Druckkraft

**Figure 4.17.** Gap-compression load-diagrams, exemplary one test per series, (a) absolute compression load, (b) normalised compression load

Ergebnisse vor, doch ist im Allgemeinen mit steigender Belastungsgeschwindigkeit eine Erhöhung der Streckgrenze verbunden, die hier nicht zu erkennen ist. Es muss außerdem ohne weiteren Nachweis davon ausgegangen werden, dass das Prüfverfahren im Rahmen der Vorgaben ausreichend robust ist und das Ergebnis keinen verfahrensbedingten Einflüssen unterliegt.

Die Ergebnisse aller Drucklastversuche sind in Tabelle 4.4 zusammengestellt. Es ist ersichtlich, dass die exemplarisch dargestellten Ergebnisse in den Bildern 4.16 und 4.17 diejenigen der entsprechenden Serie sehr gut repräsentieren. Der ungünstigste Variationskoeffizient von drei Prüfergebnissen eines regulären Prüfablaufs liegt bei 2,2 %. Die vollständigen Kurvenverläufe aller Drucklastversuche sind in Anhang A.2 dargestellt.

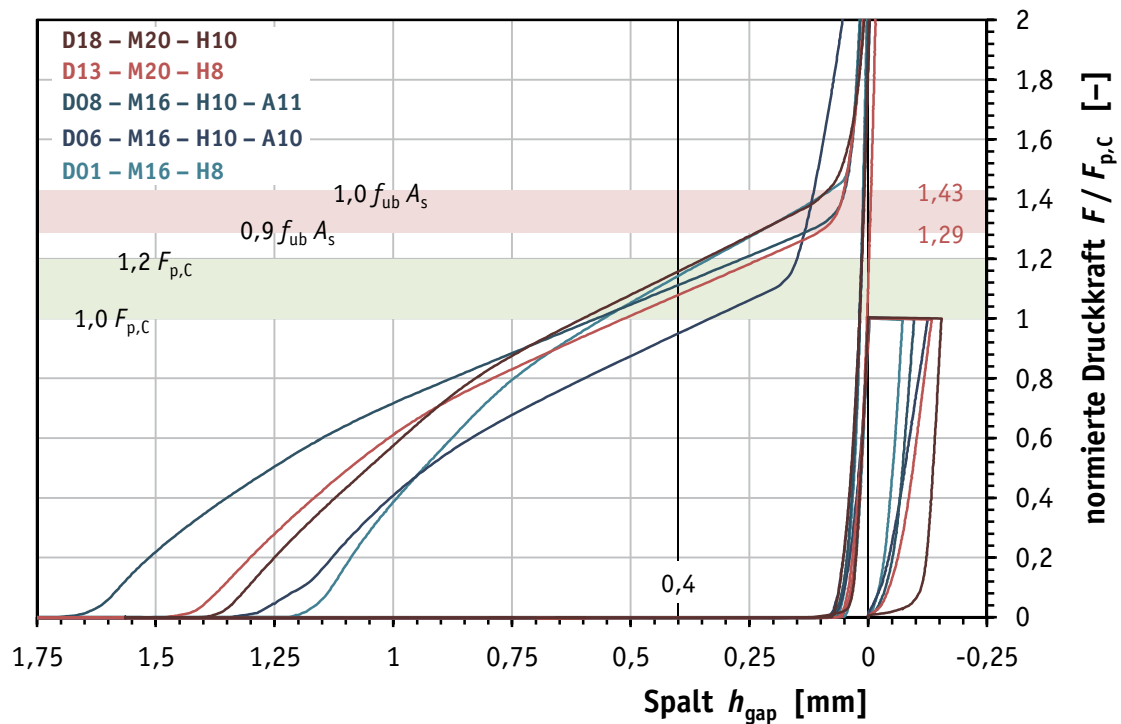
Die Spalt-Druckkraft-Kurven der Prüfungen D06 und D07 sind Bestandteil der Untersuchungen in [Mo13] und wurden zusammen mit denen der Prüfungen D08 bis D10 als Auszug in [SS14] präsentiert. Sämtliche Spalt-Druckkraft-Kurven der regulären Prüfabläufe entsprechend Tabelle 4.4 wurden ferner vorab in [Sc13] vorgestellt. Sie sind Bestandteil und Grundlage der Untersuchungen in [Bü13], die mit der Erweiterung des Prüfablaufs vervollständigt wurden.

#### 4.3.3.2 Erweiterter Prüfablauf

Die Erweiterung des Prüfablaufs bis zum vollständigen Abplatten der Überstände ist für eine Prüfung je Serie in Bild 4.18 dargestellt. Für die vier Prüfungen mit positiver Bewertung (Nr. D01, D08, D13 und D18) ist der Übergang vom Abplatten der Überstände hin zum Tragen der gesamten Fläche des DTI durch das Abknicken der Spalt-Druckkraft-Kurven mit großem Zuwachs des Gradienten einheitlich nahe dem Nullpunkt der abgeglichenen Lehre zu erkennen. Für die Prüfung D06 ist der Übergang weiter entfernt sowie der nachfolgende Gradient weniger groß. Ein derart ausgeprägtes Verhalten wurde ebenso an DTI M24 – H8/H10 festgestellt [Bü13], [Sc13]. Es scheint daher nicht unbedingt ungewöhnlich zu sein. Ob dies durch eine ungünstige geometrische Ausbildung der Überstände, unzureichende Werkstoffeigenschaften oder eine Kombination aus beidem begründet ist, ist für die nachfolgenden Untersuchungen nicht relevant und wird nicht näher untersucht.

Entsprechend Bild 4.18 und Anhang A.2 ist ersichtlich, dass das vollständige Abplatten der Überstände deutlich oberhalb der Druckkraft von  $1,2 F_{p,c}$  erreicht wurde. Als zusätzliche Orientierungspunkte sind zwei Anforderungsniveaus für Schraubenkräfte von Garnituren eingezeichnet: Zum einen der Mindestwert der

maximalen Schraubenkraft von  $0,9 f_{ub} A_s$ , der beim Anziehen der Garnitur entsprechend EN 14399-2 unter zusätzlicher Torsionsbeanspruchung erreicht werden muss. Dieser gilt für alle entsprechend EN 1090-2 verwendbaren Schraubengarnituren und Anziehverfahren. Zum anderen der nominelle Wert der Mindestbruchkraft der Schraube  $1,0 f_{ub} A_s$ , für den eine reine Zugbeanspruchung vorausgesetzt wird. Für die Serien M16–H10–Los A11 und M20–H8 liegt das Schließen der Spalte etwas oberhalb von  $0,9 f_{ub} A_s$ . Das Schließen der Spalte für die Serien M16–H8 und M20–H10 liegt bei einer Druckkraft oberhalb von  $1,0 f_{ub} A_s$ . Grundsätzlich liegen keine Anforderungen an dieses Verhalten vor. Eine Zuordnung der beobachteten Charakteristika zu Nenndurchmessern oder Festigkeitsklassen unterschiedlicher DTI ist aufgrund der vielfältigen zulässigen geometrischen und werkstofflichen Kombinationsmöglichkeiten allgemein nicht möglich und daher auch hier nicht ableitbar.



**Bild 4.18.** Spalt-Druckkraft-Kurven, exemplarisch eine Prüfung je Serie, mit Übergang zum vollständigen Abplatten der Überstände

**Figure 4.18.** Gap-compression load-curves, exemplary one test per series, including the transition to the complete flattening of the protrusions

**Tabelle 4.4.** Ergebnisse der Drucklastversuche**Table 4.4.** Results of the compression tests

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Prüfung Nr.	Prüfablauf	Entlastungen	$F_{0.4}$	Prüfdauer $t_{0.4}$	$v_F$	$F_{max}$	$F_{0.4} / F_{p,C}$	$F_{0.4} / F_{p,C}$	Bewertung $F_{0.4}$	$n$	mean	$V$	$n$	mean	$V$		
			[kN]				[s]	[kN/s]								[kN]	[-]
M16 – H8 – AND–A1																	
D01	reg.		100,4	23	4,4	360	1,14		i.O.	reg.	3	99,7	0,6%	reg. & erw.	5	99,4	0,7%
D02	reg.		99,4	23	4,4	360	1,13		i.O.								
D03	reg.		99,3	23	4,4	360	1,13		i.O.								
D04	erw.	6	98,5	117	4,4	360	1,12		i.O.								
D05	erw.	6	99,3	116	4,4	360	1,13		i.O.								
M16 – H10 – TS–A10																	
D06	reg.		104,5	12	10,0	360	0,95		n.i.O.	reg.	2	103,8	0,9%				
D07	reg.		103,1	12	10,0	360	0,94		n.i.O.								
M16 – H10 – TS–A11																	
D08	reg.		122,2	23	5,5	360	1,11		i.O.	reg.	3	121,5	2,2%	reg. & erw.	5	121,3	1,6%
D09	reg.		123,7	22	5,5	360	1,13		i.O.								
D10	reg.		118,6	22	5,5	360	1,08		i.O.								
D11	erw.	6	121,6	117	5,5	360	1,11		i.O.								
D12	erw.	6	120,4	116	5,5	360	1,10		i.O.								
M20 – H8 – AND–A2																	
D13	reg.		148,0	22	6,9	450	1,08		i.O.	reg.	3	149,0	0,8%	reg. & erw.	5	149,3	0,7%
D14	reg.		148,5	22	6,9	450	1,08		i.O.								
D15	reg.		150,4	22	6,9	450	1,10		i.O.								
D16	erw.	6	150,0	116	6,9	450	1,09		i.O.								
D17	erw.	6	149,7	115	6,9	450	1,09		i.O.								
M20 – H10 – TS–22AA																	
D18	reg.		198,5	23	8,6	450	1,16		i.O.	reg.	3	199,0	0,5%	reg. & erw.	5	197,9	1,1%
D19	reg.		198,4	23	8,6	450	1,16		i.O.								
D20	reg.		200,2	24	8,6	450	1,17		i.O.								
D21	erw.	6	198,6	117	8,6	450	1,16		i.O.								
D22	erw.	6	194,1	117	8,6	450	1,13		i.O.								

Die hohen erforderlichen Druckkräfte zum vollständigen Schließen der Spalte im Drucklastversuch geben Grund zu der Annahme, dass auch durch das Anziehen einer Garnitur mit DTI die Spalte womöglich nicht geschlossen werden können, ohne zuvor eine erhebliche Plastizierung oder sogar den Bruch der Garnitur zu erreichen.

Nach diesem Befund sollte es nicht angestrebt werden, alle Spalte des DTI durch Anziehen vollständig zu schließen. Eine Überbeanspruchung und Schädigung der Garnitur wäre nicht auszuschließen. EN 1090-2 sieht daher im Rahmen der Kontrolle und Korrektur vor, dass nicht mehr als 10% der DTI in einer Schraubengruppe einer Verbindung vollständig geschlossene Spalte aufweisen dürfen.

Die Ent- und Belastung in Laststufen wurde für jede Serie an zwei zusätzlichen Prüfkörpern durchgeführt, siehe Tabelle 4.4. In Bild 4.14 sowie in Anhang A.2 ist ersichtlich, dass die Spalt-Druckkraft-Kurven unter Anwendung des erweiterten Prüfablaufs mit Laststufen keine signifikanten Abweichungen im prinzipiellen Kurvenverlauf sowie für die Druckkraft  $F_{0,4}$  gegenüber der regulären Ausführung des Prüfablaufs aufweisen. Die statistische Bewertung der Druckkraft  $F_{0,4}$  ist auch für die zusammengefassten Serien in Tabelle 4.4 enthalten.

#### 4.3.3.3 Versuche und Prüfzeugnisse

Die vorliegenden Abnahmeprüfzeugnisse 3.1 weisen als Produktnorm der direkten Kraftanzeiger ASTM F959M aus, siehe Tabelle 4.2. Hinsichtlich der Leistungsprüfung im Drucklastversuch ist in dieser Produktnorm auf die Prüfnorm ASTM F606M verwiesen, deren Prüfverfahren für direkte Kraftanzeiger mit demjenigen nach EN 14399-9 identisch ist. Die Ergebnisse der durchgeführten Drucklastversuche und die im Zeugnis enthaltenen Werte sollten somit vergleichbar sein. In Tabelle 4.5 sind die extremalen Anzeigerdrucklasten  $F_{0,4}$  der Drucklastversuche sowie die Angaben der Zeugnisse zusammengestellt. Für die vorliegenden Lose A10 und A11 der Serien M16–H10 ist kein Zeugnis vorhanden, stattdessen für ein nicht verfügbares Los A12.

In den Prüfzeugnissen ist jeweils ein einzelner Wert der Anzeigerdrucklast bei einem Spalt von 0,4mm angegeben. Die Durchführung einer einzelnen Prüfung ist entsprechend ASTM F959M in Kombination mit ASTM F1470 zulässig, sofern der Lieferant keine Angaben des Herstellers weitergeben kann und eigene Prüfungen durchführt. Entsprechend Stichprobenumfang C ist für Losgrößen bis einschließlich 50 Stück eine einzelne Prüfung vorgesehen.

Die Anzeigerdrucklasten liegen auf vergleichbaren Niveaus, mit geringfügig höheren Werten aus den Zeugnissen für die DTI der Festigkeitsklasse 8, siehe Tabelle 4.5. Angaben zu weiteren mechanischen Prüfungen oder Anziehversuchen mit DTI sind in den Prüfzeugnissen nicht enthalten, da es sich um die abschließliche Lieferung von direkten Kraftanzeigern ohne Garnitur handelte.

**Tabelle 4.5.** Anzeigerdrucklasten bei einem Spalt von 0,4 mm aus Drucklastversuchen und Abnahmeprüfzeugnis 3.1

**Table 4.5.** Indicator compression loads at a gap of 0.4 mm from compression tests and Inspection certificate 3.1

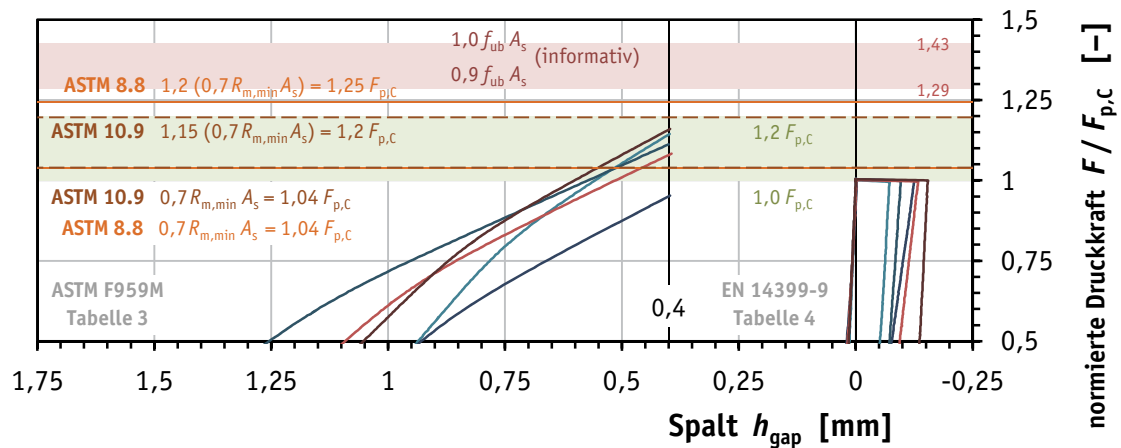
		M16 – H8	M16 – H10		M20 – H8	M20 – H10
		AND-A1	TS-A10	TS-A11	AND-A2	TS-22AA
$F_{0.4}$	min.	98,5	103,1	118,6	148,0	194,1
	max.	100,4	104,5	123,2	150,4	200,2
Zeugnis 3.1 [kN]		103	k. A. <sup>a</sup>	k. A. <sup>a</sup>	155	197

<sup>a</sup> Abnahmeprüfzeugnis für die vorliegenden Lose nicht vorhanden

Die Anforderungen an die festgestellten Anzeigerdrucklasten zur Konformität mit der entsprechenden Produktnorm unterscheiden sich in EN 14399-9 und ASTM F959M im Gegensatz zum Prüfverfahren geringfügig. In Bild 4.19 sind die oberen und unteren Grenzwerte für die Anzeigerdrucklast bei einem Spalt von 0,4 mm dargestellt. Im Gegensatz zur europäischen Vorgehensweise die nominellen Festigkeitskennwerte als Grundlage zu verwenden, wird in den nordamerikanischen ASTM-Normen der Mindestwert der Zugfestigkeit  $R_{m,min}$  als Bezugsgröße angewendet. Dadurch liegt der Mindestwert für die Anzeigerdrucklast für beide Festigkeitsklassen 8 und 10 etwa 4% über dem europäischen Mindestwert  $F_{p,C}$ . Der Höchstwert für die Klasse 8 entspricht auch nach ASTM-Norm dem 1,2-fachen Mindestwert. Für die Klasse 10 ist dieser allerdings auf das 1,15-fache des Mindestwerts verringert und ist somit nahezu identisch mit dem europäischen Niveau von  $1,2 F_{p,C}$  beruhend auf den nominellen Kennwerten.

Sind die Leistungsanforderungen für DTI der Festigkeitsklasse 10 nach ASTM F959M erfüllt, so gilt dies zugleich auch für die Erfüllung der Anforderungen nach EN 14399-9. Für die Festigkeitsklasse 8 übersteigt der zulässige Höchstwert nach ASTM F959M den entsprechenden Höchstwert nach EN 14399-9. Eine Bewertung des Prüfergebnisses muss dies berücksichtigen.

Innerhalb der jeweiligen Normen-Reihen – ASTM oder EN – sind an den direkten Kraftanzeiger vergleichbare Anforderungen gestellt. Die Festlegung des Bemessungswertes der Zugtragfähigkeit und des Mindestwertes der Vorspannkraft beruhen auf konsistenten Niveaus, entweder den Mindestwerten (ASTM) oder den Nennwerten (EN) der Festigkeiten.



**Bild 4.19.** Spalt-Druckkraft-Kurven entsprechend regulärem Prüfablauf mit Leistungsanforderungen nach EN 14399-9 und ASTM F959M

**Figure 4.19.** Gap-compression load-curves according to the regular test sequence with performance requirements according to EN 14399-9 and ASTM F959M

## 4.4 Anziehversuche an Garnituren mit direkten Kraftanzeigern

### 4.4.1 Allgemeines

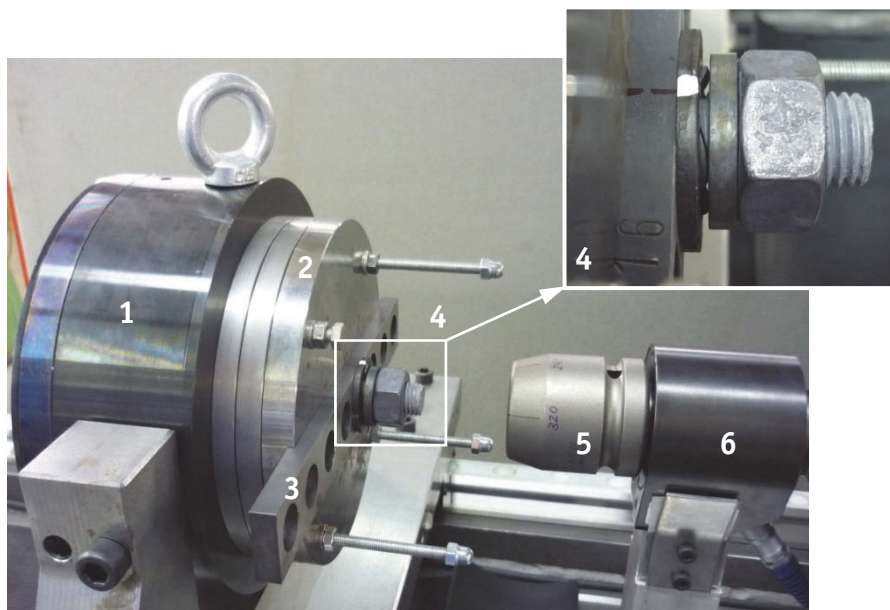
Zusätzlich zum Drucklastversuch am einzelnen direkten Kraftanzeiger muss dessen Gebrauchseignung auch in Kombination mit der vorgesehenen Garnitur aus Schraube, Mutter und Scheiben nachgewiesen werden. Dazu ist in EN 14399-9 die „Prüfung der Eignung zur Feststellung der Schraubenkraft“ vorgeschrieben. Da im Zuge dieser Prüfung das Last-Verformung-Verhalten des DTI erfasst werden kann, wird diese in den Vordergrund der folgenden Untersuchungen gestellt. Die Prüfung der weiteren Anforderungen an die übrigen Komponenten der Garnitur entsprechend Tabelle 2.2 wird nicht näher betrachtet. Hierzu sind weitere Informationen in [SS12b], [Mo13] und [SS14] verfügbar.

Garnituren, die für den Einsatz mit direkten Kraftanzeigern vorgesehen sind, sind nach EN 14399-9 unabhängig von der vorhandenen Schmierung ausschließlich mit der  $k$ -Klasse K0 zu bezeichnen. Aufgrund des Einflusses der Schmierung bzw. der Reibeigenschaften auf die Gebrauchseignung der Garnitur werden diese in der Regel werksseitig geschmiert. Wie sich eine Verschlechterung der Reibeigenschaften auf das Anziehverhalten der Garnitur auswirken kann, wird anhand von Versuchsergebnissen erläutert, die bereits ohne Berücksichtigung des Last-Verformung-Verhaltens in [SS12b] und [SS14] publiziert wurden.

#### 4.4.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Anziehversuche wurden unter Verwendung des Anziehprüfstands am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen durchgeführt. Der Anziehprüfstand ist mit Sensoren, Mess- und Steuerungstechnik der Fa. SCHATZ, Remscheid ausgestattet. Mit unterschiedlichen Sensoren werden Messbereiche bis 15.000 Nm für das Anziehdrehmoment und bis 1.800 kN für die Vorspannkraft abgedeckt. Das Anziehen erfolgt durch einen elektrischen Getriebemotor. Das erzeugte Anziehdrehmoment sowie der Drehwinkel werden mit Hilfe des Drehmoment-/Drehwinkel-Sensors (6) erfasst und aufgezeichnet, siehe Bild 4.20. Die Vorspannkraft und das Gewindemoment werden bauartbedingt gemeinsam im Vorspannkraft-/Gewindemoment-Sensor (1) erfasst. Die Klemmlänge der Schraubengarnitur kann mit Hilfe von Ausgleichsscheiben (2) angepasst werden.

Um den Spalt zwischen den Überständen des DTI während des Anziehvorgangs überwachen zu können, ist eine allseitige händische und visuelle Zugänglichkeit



- |                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| 1 Vorspannkraft-/Gewindemoment-Sensor | 4 DTI unter der mutterseitigen Scheibe (Shb.HN), Anziehen durch Drehen der Mutter (Mu.HV.rot) |
| 2 Ausgleichsscheiben                  | 5 Steckschlüsseinsatz   |
| 3 Durchgehärtete Auflageplatte        | 6 Drehmoment-/Drehwinkel-Sensor   |

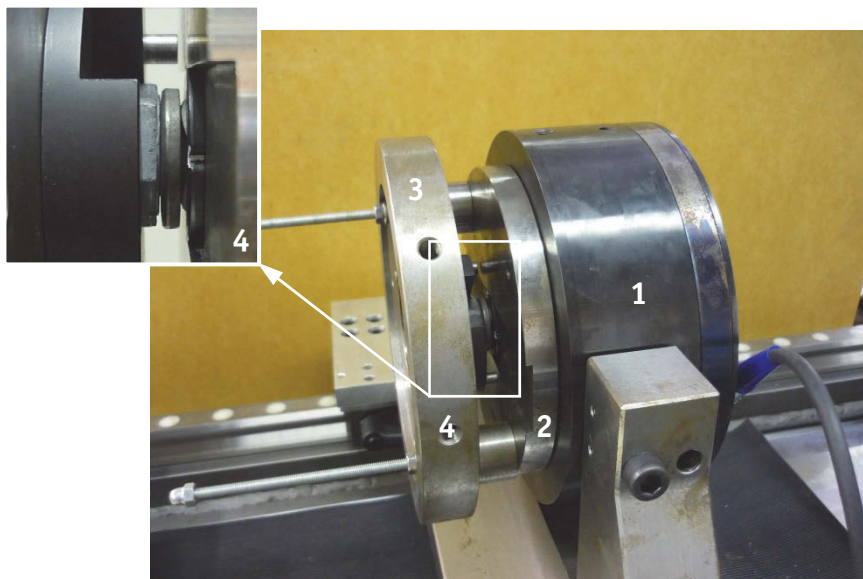
**Bild 4.20.** Versuchsaufbau für Anziehversuche mit DTI unter der rotierten Komponente, exemplarisch M16–H10–Mu.rot, nach [SS12a] und [SS14]

**Figure 4.20.** Test set-up for tightening tests including DTI placed under the rotated component, exemplary M16–H10–Mu.rot, according to [SS12a] and [SS14]



zum DTI erforderlich. Für die Montagekonfiguration mit dem DTI auf der Seite der rotierten Komponente ist dies prüftechnisch – wie auch baupraktisch – unproblematisch, siehe Bild 4.20. Die Montagekonfiguration mit dem DTI auf der Seite der fixierten, d.h. nicht rotierten Komponente, erforderte die inverse Ausrichtung des Vorspannkraft-Sensors, siehe Bild 4.21. Um den Schraubenkopf verdrehsicher zu lagern, wurde eine Hilfskonstruktion am Sensor platziert, die eine querkraftfreie Fixierung mit axialer Verschieblichkeit gewährleistete. Mit dem Abplatten der Überstände ist in dieser Konfiguration eine axiale Verschiebung des Schraubenkopfes verbunden.

Das Anziehen erfolgte mit einer Drehgeschwindigkeit von 2 U/min. Für das Ausmessen der Spalte des DTI wurde der Anziehvorgang an definierten Schraubenkraftniveaus unterbrochen. Der Steckschlüsseinsatz wurde gelöst, so dass eine Rückfederung der tordierten Schraube, verbunden mit einem leichten Abfall der Schraubenkraft, möglich war.



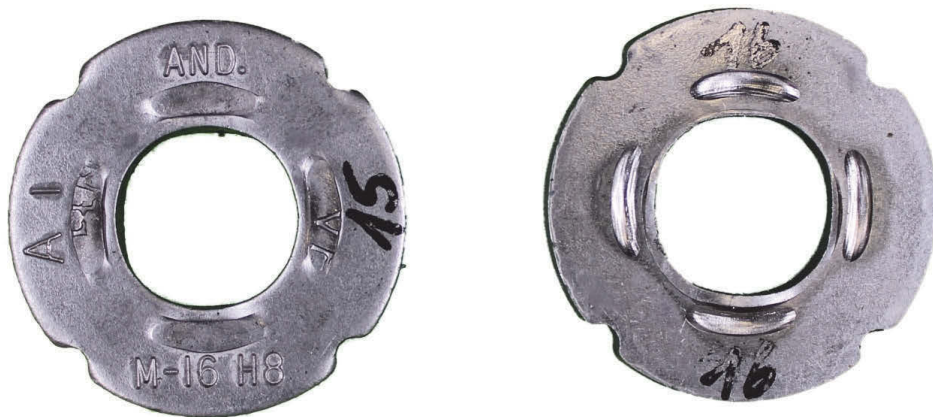
- |                      |   |
|----------------------|---|
| 1 Vorspannkraft-/    | 3 Verdrehsichere Lagerung des Schraubenkopfs    |
| Gewindemoment-Sensor | 4 DTI unter der kopfseitigen Scheibe (Shb.HB),  |
| 2 Ausgleichsscheibe  | Schraube gegen Verdrehen gesichert (Shr.HV.fix) |

**Bild 4.21.** Versuchsaufbau für Anziehversuche mit DTI unter der fixierten Komponente, exemplarisch M16-H10-Shr.fix, nach [SS14]

**Figure 4.21.** Test set-up for tightening tests including DTI placed under the clamped component, exemplary M16-H10-Shr.fix, according to [SS14]

Die Vermessung der Spaltweiten erfolgte mit Fühllehren unterschiedlicher Dicke. Da die Abstufung der Dicke der verwendeten Fühllehren nicht für alle Versuche identisch war, werden die angewendeten Sätze an Fühllehren in Paletten eingeteilt. Die Abstufung der Dicke der Fühllehren in den Paletten P0, P1 und P2 ist in Tabelle 4.6 zusammengestellt.

Die nachfolgenden Bilder 4.22 bis 4.26 zeigen exemplarisch die verformten direkten Kraftanzeiger nach Beendigung der Versuche.



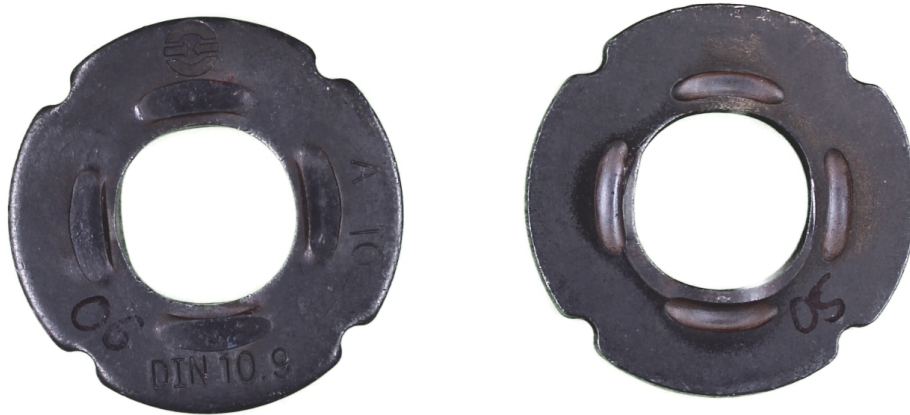
**Bild 4.22.** Direkter Kraftanzeiger M16 – H8 (8.8) – unbeschichtet – Los A1 – nach Test

**Figure 4.22.** Direct tension indicator M16 – H8 (8.8) – uncoated – lot A1 – after testing



**Bild 4.23.** Direkter Kraftanzeiger M20 – H8 (8.8) – unbeschichtet – Los A2 – nach Test

**Figure 4.23.** Direct tension indicator M20 – H8 (8.8) – uncoated – lot A2 – after testing



**Bild 4.24.** Direkter Kraftanzeiger M16 - 10.9 (H10) - unbeschichtet - Los A10 - nach Test  
**Figure 4.24.** Direct tension indicator M16 - 10.9 (H10) - uncoated - lot A10 - after testing



**Bild 4.25.** Direkter Kraftanzeiger M16 - 10.9 (H10) - unbeschichtet - Los A11 - nach Test  
**Figure 4.25.** Direct tension indicator M16 - 10.9 (H10) - uncoated - lot A11 - after testing



**Bild 4.26.** Direkter Kraftanzeiger M20 - 10.9 (H10) - unbeschichtet - Los 22AA - n. Test  
**Figure 4.26.** Direct tension indicator M20 - 10.9 (H10) - uncoated - lot 22AA - after testing

**Tabelle 4.6.** Dicke der eingesetzten Fühllehren in unterschiedlicher Abstufung

**Table 4.6.** Thickness of the used feeler gauges in different gradations

Fühllehren Dicke [mm]		
Palette P0	Palette P1	Palette P2
		0,03
		0,04
	0,05	0,05
		0,06
		0,07
		0,075
		0,08
		0,09
	0,1	0,1
		0,12
0,125	0,125	0,125
	0,15	0,15
		0,18
	0,2	0,2
		0,22
0,25	0,25	0,25
		0,28
	0,3	0,3
		0,32
	0,35	0,35
0,4	0,4	0,4
	0,45	0,45
	0,5	0,5
	0,55	0,55
	0,6	0,6
	0,65	0,65
	0,7	0,7
	0,75	0,75
	0,8	0,8

### 4.4.3 Versuchsergebnisse und Bewertung

#### 4.4.3.1 Anziehverhalten unter Berücksichtigung der Schmierung

Für die Serien M16–H10–Los A10 und M20–H10 wurden in Kombination mit HV-Garnituren Anziehversuche in Form der *Prüfung der Eignung zum Vorspannen mit direktem Kraftanzeiger in einer Garnitur* durchgeführt. Dabei wurde sowohl zwischen den Montagekonfigurationen *Shr.fix* und *Mu.rot* als auch zwischen der werkseitigen Schmierung der Mutter entsprechend *k*-Klasse K1 und einer ungeschmierten Mutter unterschieden.

Die maßgebenden Ergebnisse lassen sich anhand der Drehwinkel-Schraubenkraft-Kurven ablesen, siehe Bilder 4.27 und 4.28. Zur allgemeinen Information sind die Anforderungen an die Gebrauchseignung nach Tabelle 2.2 für die entsprechenden Garnituren mit DTI in Form der hervorgehobenen Flächen eingezeichnet. Dies ist zum einen die Mindestschraubenkraft  $0,9 f_{ub} A_s$ , die durch Anziehen der Garnitur mindestens erreicht werden muss, allerdings ohne eine Anforderung an den dazu benötigten Drehwinkel. Dieser Nachweis ist formal nach EN 14399-2 nur mit einer Garnitur ohne DTI zu erbringen. Zum anderen ist der Weiterdrehwinkel  $1,1 \Delta\theta_{2,i \min}$  eingetragen, dessen Zählung ab dem erstmaligen Erreichen der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  beginnt. Die Skalierung der Diagramme ist derart vorgenommen, dass der Nullpunkt der Abszisse diesem Punkt entspricht. Der Bruch der Garnitur oder das Abfallen der Drehwinkel-Schraubenkraft-Kurve auf die Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  darf zur Erfüllung der Anforderung erst nach Überschreiten des Mindestweiterdrehwinkels erfolgen.

Grundsätzlich ist ersichtlich, dass eine ausreichende Schmierung erforderlich ist, damit die gegebenen Komponenten sowohl eine ausreichend hohe Schraubenkraft als auch einen ausreichend großen Weiterdrehwinkel – als Maße für die Festigkeit und Duktilität bei der Montage – erreichen. Für die Garnituren ohne Schmierung sorgt der kombinierte Spannungszustand aus Normalkraft (Schraubenkraft) und großem Torsionsmoment (Gewindemoment) für eine Beanspruchung der Schraube, die einen frühzeitigen Bruch bei vergleichsweise geringem Drehwinkel verursacht.

Der gegebene Stichprobenumfang hat für die unterschiedlichen Montagekonfigurationen keine signifikanten Unterschiede erkennen lassen. Es scheint insbesondere für die ungeschmierten Muttern der Serie M20–H10 in der Montagekonfiguration *Shr.fix* eine zusätzliche Beeinträchtigung durch eine längere Lagerzeit gegeben zu haben. Das deutlich frühere Versagen der ungeschmierten Garni-



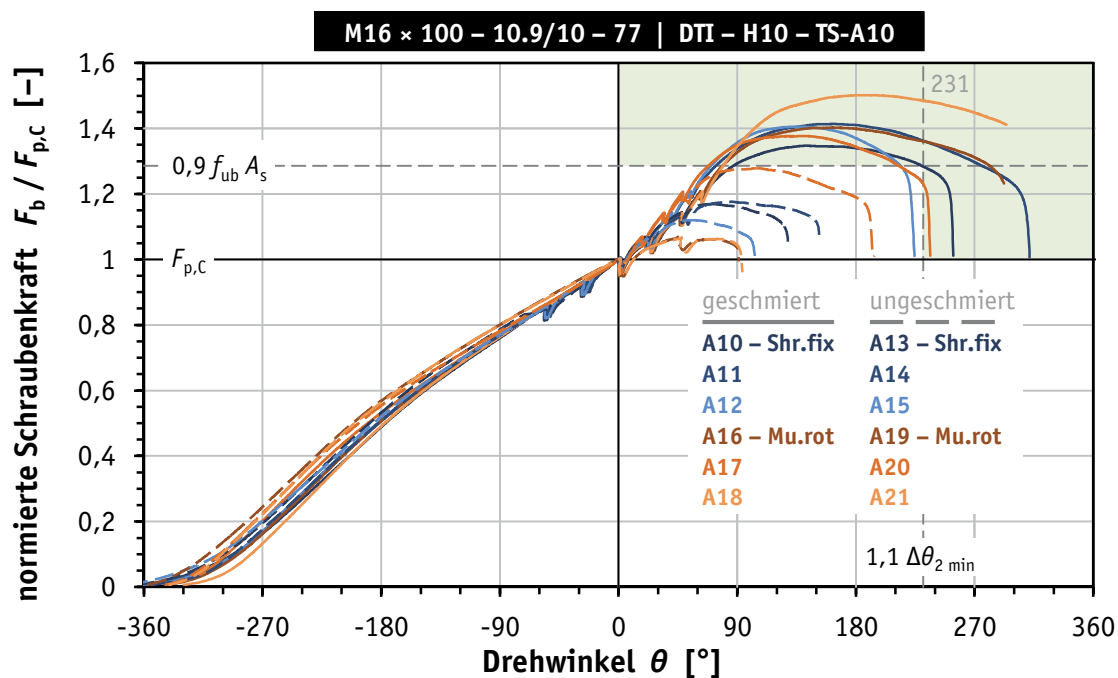
turen in dieser Montagekonfiguration ist vermutlich durch den verringerten Ölfilm auf den Muttern beeinflusst.

Es ist „zusammenfassend [...] festzustellen, dass eine Schmierung der Garnitur auch bei Verwendung von DTI für die Gebrauchseignung erforderlich ist, obwohl dies per Definition der  $k$ -Klasse K0 nicht unmittelbar ersichtlich ist. Die Hersteller von Garnituren kennen diese Zusammenhänge und sorgen für eine ausreichende werksseitige Schmierung alleine schon deshalb, weil die Gebrauchseigenschaften auch der Garnituren der  $k$ -Klasse K0 hinsichtlich der maximalen Schraubenkraft und des Weiterdrehwinkels erfüllt sein müssen. Unter Baustellenbedingungen dürfen diese Garnituren der  $k$ -Klasse K0 nicht weniger sorgsam hinsichtlich der Erhaltung des werksseitigen Schmierzustands behandelt werden als Garnituren der  $k$ -Klassen K1 oder K2. Eine Nachschmierung und damit Verbesserung der Schmierung ist für Garnituren der  $k$ -Klasse K0 zusammen mit DTI allerdings bedenkenlos möglich.“ [SS14]

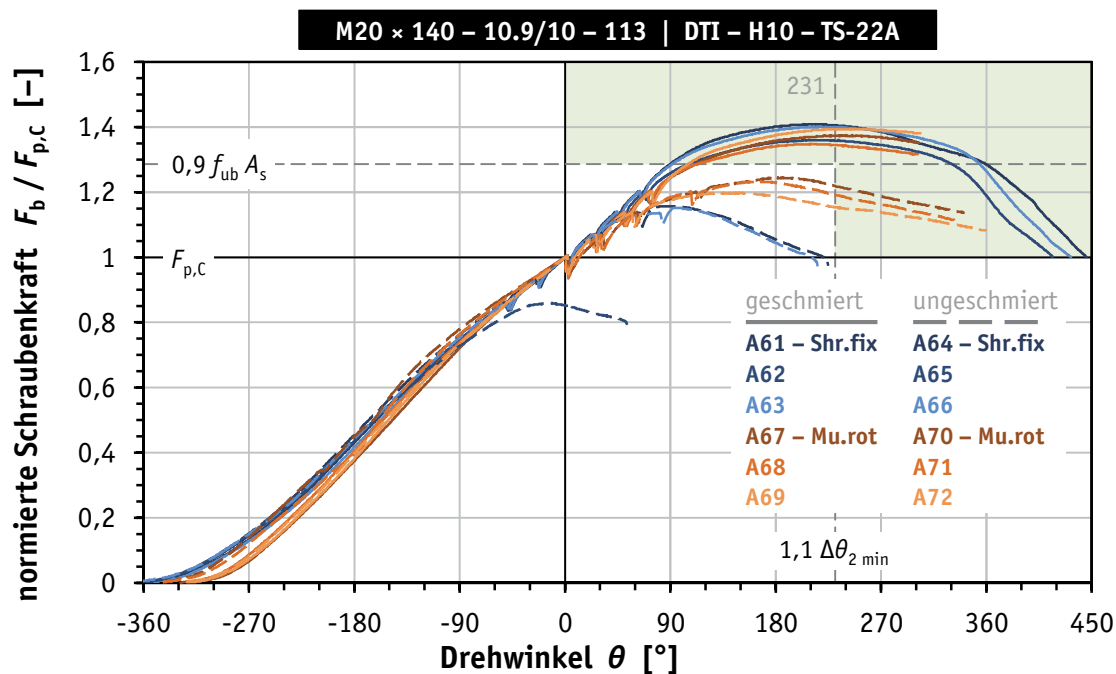
Die Drehwinkel-Schraubenkraft-Kurven aus den Bildern 4.27 und 4.28 sind ebenso in den Bildern 4.29 und 4.30 dargestellt. Zusätzlich ist die in den Anziehversuchen durchgeführte Bestimmung der Höhe der Spalte in den Diagrammen als Drehwinkel-Spalt-Kurve enthalten. Es handelt sich dabei um die gemittelte Höhe  $h_{\text{gap,m}}$  aller Spalte eines DTI. Die Ermittlung der Höhe ist den nachfolgenden Erläuterungen in Kapitel 4.4.3.2 zu entnehmen.

Die Anziehversuche der Serien M16–H8 und M20–H8 wurden unter Verwendung von HV-Garnituren der Festigkeitsklasse 10.9 durchgeführt. Die Drehwinkel-Schraubenkraft-Kurven sind in den Bildern 4.31 und 4.32 dargestellt. Die Serien der Festigkeitsklasse H8 sind nicht Bestandteil der Untersuchungen zum Einfluss der Schmierung. Sie dienen ausschließlich der Ermittlung der Montagevorspannkraft mit dem Fühllehren-Kriterium und der Bestimmung des Last-Verformung-Verhaltens des DTI.

Die HV-Garnituren wurden dazu mehrfach wiederverwendet. Dies war möglich, da die Beanspruchung auf den elastischen Bereich begrenzt wurde. Das Schmieren der Gewinde und der Auflagefläche der Mutter erfolgte mit GLEIT-MO 100 S, Montagepastenspray auf Molybdändisulfid-Basis von der FUCHS LUBRITECH GMBH. Im Zusammenwirken der jeweils erneuerten Schmierung mit der „eingespielten“ Gewindepaarung wurden Reibeigenschaften entsprechend der  $k$ -Klasse K1 oder besser erzielt.



**Bild 4.27.** Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm für Serie M16–H10–TS-A10 nach [SS14]  
**Figure 4.27.** Angle of rotation-bolt load-diagram for M16–H10–TS-A10 series according to [SS14]



**Bild 4.28.** Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm für Serie M20–H10–TS-22A nach [SS14]  
**Figure 4.28.** Angle of rotation-bolt load-diagram for M20–H10–TS-22A series according to [SS14]

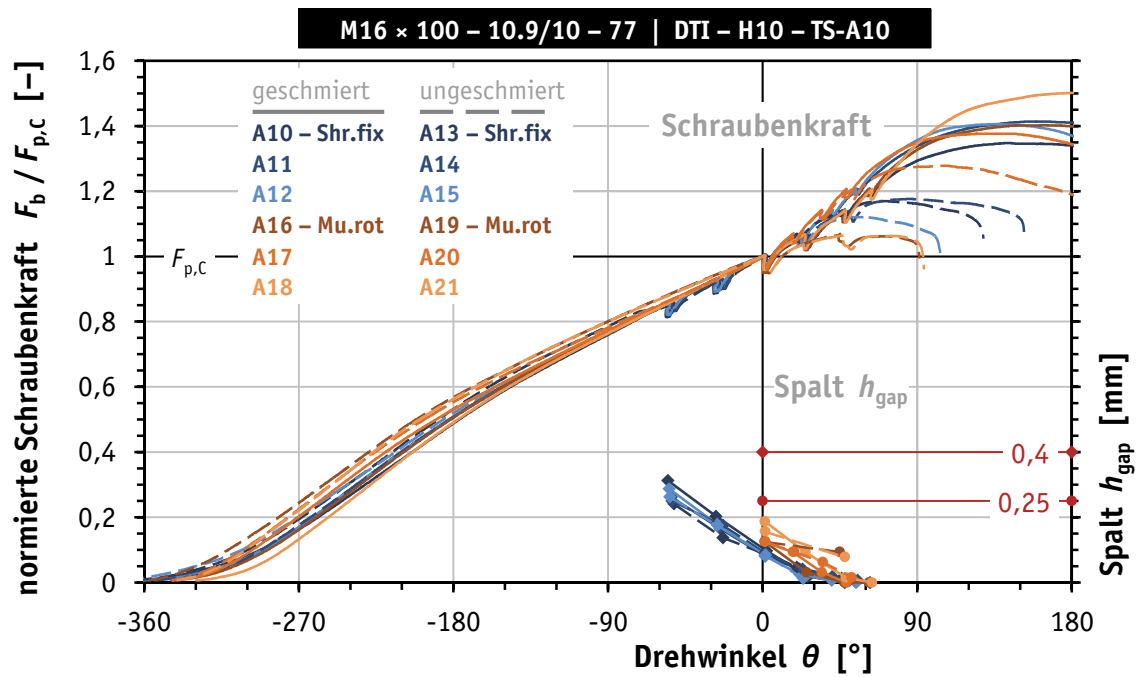


Bild 4.29. Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm für Serie M16-H10-TS-A10

Figure 4.29. Angle of rotation-bolt load-diagram for M16-H10-TS-A10 series

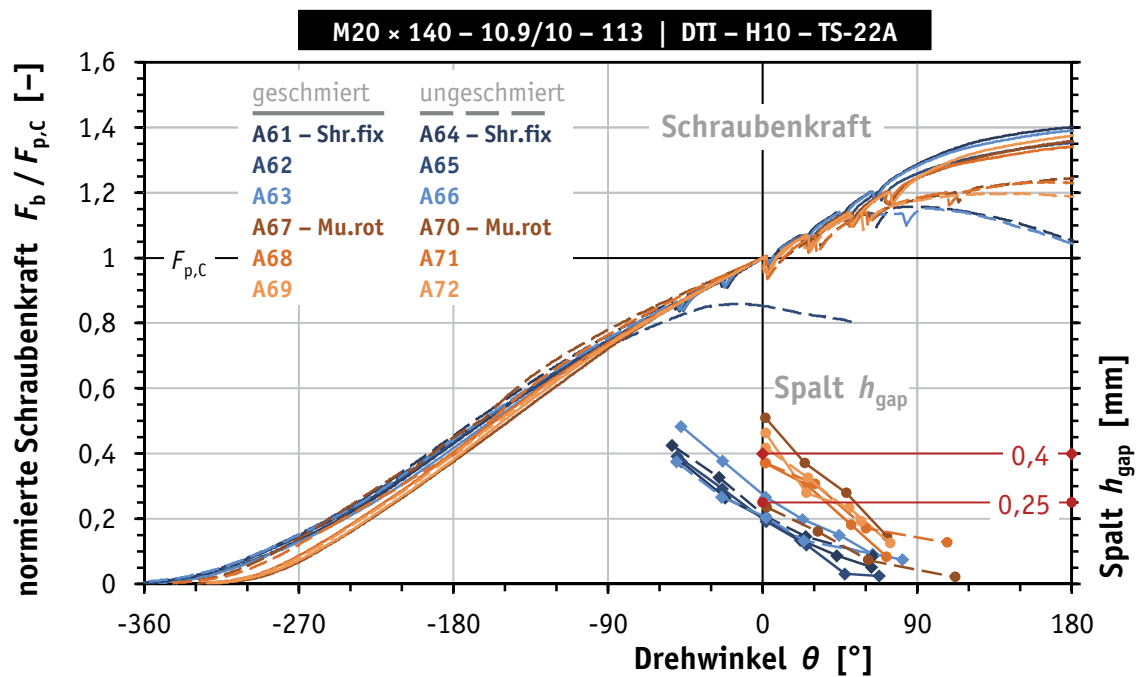


Bild 4.30. Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm für Serie M20-H10-TS-22A

Figure 4.30. Angle of rotation-bolt load-diagram for M20-H10-TS-22A series



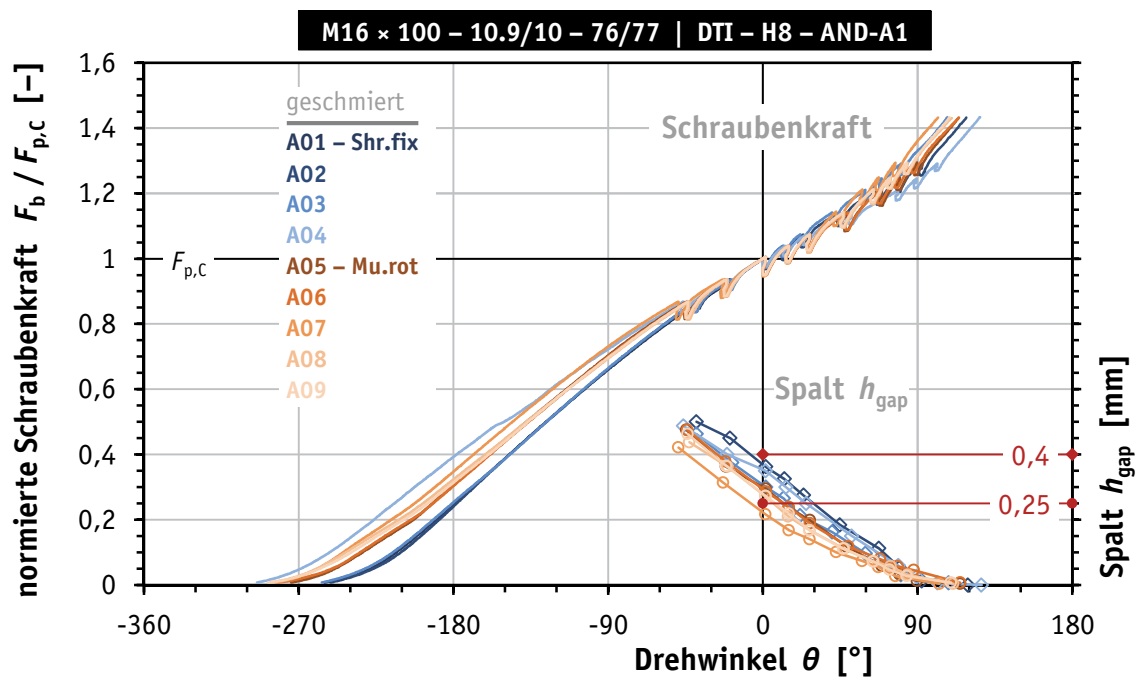


Bild 4.31. Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm für Serie M16-H8-AND-A1

Figure 4.31. Angle of rotation-bolt load-diagram for M16-H8-AND-A1 series

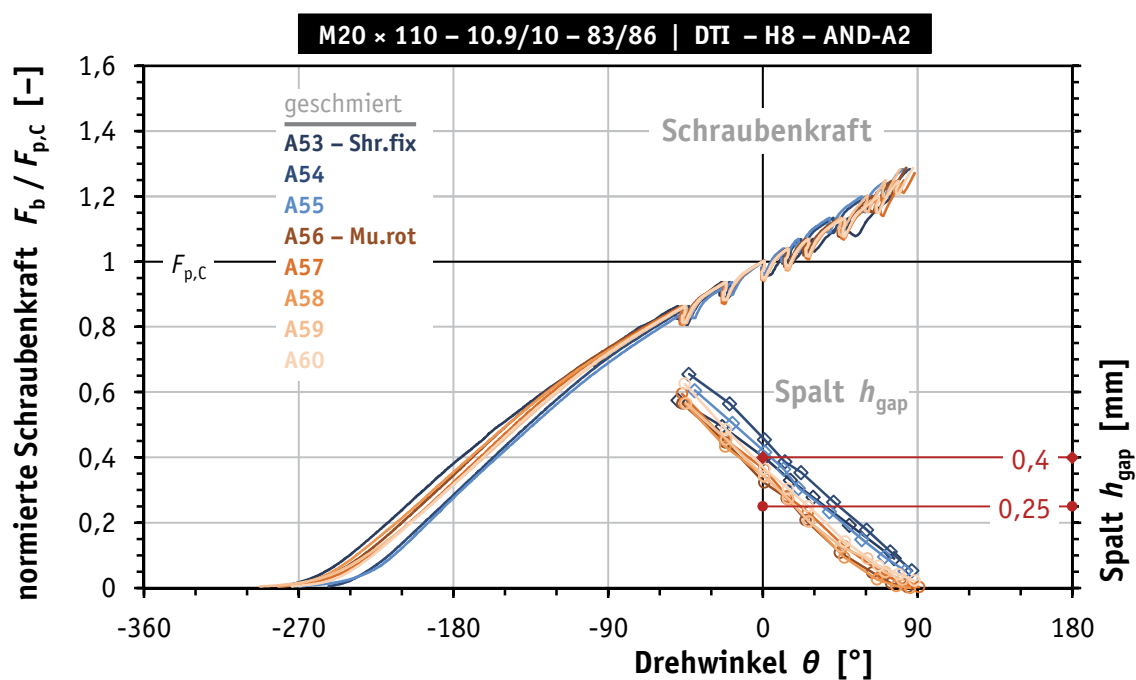


Bild 4.32. Drehwinkel-Schraubenkraft-Diagramm für Serie M20-H8-AND-A2

Figure 4.32. Angle of rotation-bolt load-diagram for M20-H8-AND-A2 series

#### 4.4.3.2 Montagevorspannkkräfte mit Fühllehren-Kriterium

Der Anziehvorgang wurde in regelmäßigen Abständen unterbrochen, um alle vorhandenen Spalte mit einer Palette von Fühllehren auszumessen. Die entsprechenden Unterbrechungen sind in den Drehwinkel-Schraubenkraft-Kurven, siehe Bilder 4.27 bis 4.32, durch den geringfügig rückläufigen Drehwinkel aus dem Auskuppeln des Steckschlüsseleinsatzes und durch das Absinken der Schraubenkraft aus der elastischen Rückfederung der Garnitur deutlich zu erkennen.

Die Ergebnisse der Messungen mit Fühllehren sind exemplarisch für zwei Prüfungen in den Tabellen 4.7 und 4.8 zusammengestellt. Die einzelnen Schritte der Anziehversuche sind für alle weiteren Versuche analog zu Tabelle 4.7 in Anhang B.1 enthalten. Hier handelt es sich um Garnituren mit DTI der Größe M16 mit vier Überständen bzw. Spalten. Für jeden Spalt wurde bei jedem Anziehschritt die Mindesthöhe des Spaltes  $h_{\text{gap,inf}}$  protokolliert. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass eine Fühllehre mit eben dieser protokollierten Dicke in den Spalt eindringen konnte, die nächst dickere Fühllehre der genutzten Palette entsprechend Tabelle 4.6 jedoch nicht. Die Unsicherheit bezüglich der wirklichen Höhe des Spaltes besteht im Unterschied der Dicken zwischen der nicht eindringenden, d.h. zurückgewiesenen Fühllehre, und der eindringenden Fühllehre.

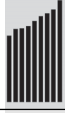










Die gemittelte Höhe  $h_{\text{gap,m}}$  aller Spalte in einem Anziehschritt ergibt sich aus dem Mittelwert aller größten unteren Schranken  $h_{\text{gap,inf}}$  und aller kleinsten oberen Schranken  $h_{\text{gap,sup}}$ . In Tabelle 4.8 sind diese exemplarisch zusätzlich zusammengestellt. Die Halbierung der Spannweite  $R$  zwischen Maximum und Minimum der Schranken ergibt die Streuung  $R/2$ , die als ein Maß für das gleichmäßige Abplatten der Überstände betrachtet werden kann. Je größer die Streuung ist, desto größer war das ungleichmäßige Abplatten der Überstände und die Schiefstellung der entsprechenden Auflagefläche.

Die Anzahl  $n_{\text{refusal}}$  der festgestellten Sperrweiten je Anziehschritt ist ebenso in den Tabellen 4.7 und 4.8 zusammengestellt. Dabei handelt es sich um die Anzahl der Spalte, in die die normativ festgelegte Fühllehre nicht eindringen konnte. Je nach Montagekonfiguration des DTI sind dies die Fühllehren mit einer Dicke von 0,4 mm (*Shr.fix*) oder 0,25 mm (*Mu.rot*). Die einzelnen Spalte  $h_{\text{gap,inf}}$ , die als Sperrweite gezählt werden können, sind in der tabellarischen Darstellung grau hinterlegt, das Erreichen der erforderlichen Anzahl von Sperrweiten zur Anzeige des Erreichens der Mindestvorspannkraft ebenso. Die bei Eintreffen des Fühllehren-Kriteriums erzielten Vorspannkkräfte lagen bei  $1,01 F_{p,c}$  (A01) und  $1,14 F_{p,c}$  (A05). Für Prüfung A01 kann damit nicht von einem zweifelsfreien und sicheren

Erreichen der Mindestvorspannkraft durch Anwendung des Fühllehren-Kriteriums ausgegangen werden, für Prüfung A05 hingegen schon. Der Anziehvorgang wurde über das Erreichen des Fühllehren-Kriteriums hinaus fortgesetzt, für die Serien der Festigkeitsklasse H8 mit Garnituren der Festigkeitsklasse 10.9/10 so weit, wie es innerhalb einer elastischen Beanspruchung der Garnitur bzw. innerhalb des Messbereichs des Vorspannkraft-Sensors möglich war.













**Tabelle 4.7.** Ergebnisse des Anziehens mit DTI, exemplarisch Anziehversuch A01 (Shr.fix)

**Table 4.7.** Results of the tightening with DTI, exemplary tightening test A01 (Shr.fix)

M16 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 6 – A01										
$F_S$ [kN]		80	88	89	92	98	104	108	112	124
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,64	0,7	0,71	0,73	0,78	0,83	0,86	0,89	0,98
$F_S / F_{p,C}$ [-]		0,91	1,01	1,02	1,05	1,12	1,18	1,22	1,28	1,41
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,55	0,45	0,45	0,4	0,35	0,25	0,2	0,15	0
	2	0,35	0,25	0,2	0,2	0,125	0	0	0	0
	3	0,35	0,25	0,2	0,2	0,15	0,05	0	0	0
	4	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0
Fühllehre [mm]	0,40									
$n_{refusal}$ [-]		2	3	3	3	4	4	4	4	4
$h_{gap,m}$ [mm]	P1	0,44	0,35	0,31	0,29	0,23	0,14	0,09	0,06	0,01
$R/2$ [mm]		±0,13	±0,13	±0,15	±0,13	±0,14	±0,15	±0,13	±0,1	±0,03

**Tabelle 4.8.** Ergebnisse des Anziehens mit DTI, exemplarisch Anziehversuch A05 (Mu.rot)

**Table 4.8.** Results of the tightening with DTI, exemplary tightening test A05 (Mu.rot)

M16 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 17 – A05												
$F_S$	[kN]		76	82	88	91	94	100	106	110	114	126
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,61	0,66	0,7	0,73	0,75	0,8	0,85	0,87	0,91	1,01
$F_S / F_{p,C}$	[-]		0,87	0,94	1,0	1,04	1,07	1,14	1,21	1,25	1,29	1,44
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,5	0,4	0,35	0,32	0,3	0,2	0,1	0,06	0	0
		2	0,5	0,4	0,35	0,28	0,25	0,15	0,1	0,06	0,03	0
		3	0,4	0,25	0,15	0,1	0,05	0	0	0	0	0
		4	0,4	0,32	0,25	0,2	0,15	0,075	0	0	0	0
Fühllehre	[mm]	0,25										
$n_{refusal}$	[-]		0	0	1	2	2	4	4	4	4	4
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,48	0,36	0,3	0,24	0,2	0,12	0,06	0,03	0,01	0
$R / 2$	[mm]		±0,08	±0,1	±0,13	±0,13	±0,14	±0,11	±0,06	±0,04	±0,02	±0,02
$h_{gap,sup,m}$	[mm]		0,5	0,38	0,32	0,25	0,21	0,13	0,07	0,04	0,02	0,01
$R_{sup} / 2$	[mm]		±0,05	±0,09	±0,11	±0,12	±0,13	±0,1	±0,05	±0,02	±0,01	±0
$h_{gap,inf,m}$	[mm]		0,45	0,34	0,28	0,23	0,19	0,11	0,05	0,03	0,01	0
$R_{inf} / 2$	[mm]		±0,05	±0,08	±0,1	±0,11	±0,13	±0,1	±0,05	±0,03	±0,02	±0

Die Bewertung der mit dem Fühllehren-Kriterium erzielten Vorspannkraft wird entsprechend Tabelle 4.10 durchgeführt. Das Fühllehren-Kriterium gilt entsprechend EN 14399-9 als erfüllt, wenn die Anzahl  $n_{\text{refusal}}$  der festgestellten Sperrweiten die Hälfte aller vorhandenen Spalte bzw. Überstände ( $\frac{1}{2} n_{\text{gap}}$ ) übertrifft. Ist das Fühllehren-Kriterium noch nicht erfüllt, die Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  allerdings schon erreicht oder überschritten, so sorgt die Fortsetzung des Anziehens für eine weitere Erhöhung der Vorspannkraft. Entsprechende Konstellationen sind mit „i.O.“ (in Ordnung) entsprechend Tabelle 4.10 bewertet. In Tabelle 4.8 sind solche Anziehschritte vorhanden. Die Zusammenfassung aller Prüfungen in den Tabellen 4.9 und 4.11 beinhaltet ausschließlich Anziehschritte, die erstmalig das Fühllehren-Kriterium erfüllten. Ist dies nicht der erste Schritt und ist die Mindestvorspannkraft überschritten, lautet die Bewertung ebenso „i.O.“.

**Tabelle 4.9.** Montagevorspannkraft bei Erreichen des Fühllehren-Kriteriums, Serien M16  
**Table 4.9.** Assembly preloads upon reaching the feeler gauge criterion, M16 series

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Prüfung Nr.	DTI Nr.	Montage-konfiguration	erf. Fühllehre [mm]	Schmierung	Anziehschritt zu $F_s$	$F_s$ [kN]	$F_s / F_{ub}$ [-]	$F_s / F_{p,c}$ [-]	$F_s / F_{p,c} - 1$ [-]	$n_{\text{refusal}}$ [-]	$n_{\text{gap}}$ [-]	$n_{\text{refusal}} / n_{\text{gap}}$	$h_{\text{gap},m}$ [mm]	$R/2$ [mm]	$h_{\text{gap},m}$	$h_{\text{gap},inf}$	Bewertung
<b>M16 – H8 – AND-A1</b>																	
A01	6	Shr.fix	0,4	K1	2	88,5	0,7	1,01		3	4		0,35	±0,13			n.i.O.
A02	7	Shr.fix	0,4	K1	3	88,3	0,7	1,0		3	4		0,36	±0,1			n.i.O.
A03	8	Shr.fix	0,4	K1	3	88,4	0,7	1,01		4	4		0,3	±0,13			n.i.O.
A04	9	Shr.fix	0,4	K1	3	88,3	0,7	1,0		4	4		0,35	±0,08			n.i.O.
A05	17	Mu.rot	0,25	K1	6	100,3	0,8	1,14		4	4		0,12	±0,11			i.O.
A06	18	Mu.rot	0,25	K1	4	91,4	0,73	1,04		3	4		0,24	±0,15			i.O.
A07	19	Mu.rot	0,25	K1	5	94,5	0,75	1,07		3	4		0,14	±0,18			i.O.
A08	20	Mu.rot	0,25	K1	4	91,4	0,73	1,04		3	4		0,21	±0,17			i.O.
A09	21	Mu.rot	0,25	K1	5	94,4	0,75	1,07		3	4		0,17	±0,18			i.O.
<b>M16 – H10 – TS-A10</b>																	
A10	11 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	K1	1	94,0	0,6	0,86		4	4		0,31	±0,1			n.i.O.
A11	12 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	K1	1	94,0	0,6	0,86		3	4		0,26	±0,15			n.i.O.
A12	13 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	K1	1	94,0	0,6	0,86		4	4		0,29	±0,05			n.i.O.
A13	14 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	ohne	1	94,0	0,6	0,86		4	4		0,24	±0,11			n.i.O.
A14	15 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	ohne	1	94,0	0,6	0,86		3	4		0,25	±0,2			n.i.O.
A15	16 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	ohne	1	94,0	0,6	0,86		4	4		0,26	±0,1			n.i.O.
A16	04 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	K1	1	110,0	0,7	1,0		4	4		0,13	±0,13			n.i.O.
A17	05 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	K1	1	110,0	0,7	1,0		4	4		0,13	±0,13			n.i.O.
A18	06 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	K1	1	110,0	0,7	1,0		4	4		0,19	±0,06			n.i.O.
A19	07 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	ohne	1	110,0	0,7	1,0		4	4		0,13	±0,13			n.i.O.
A20	08 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	ohne	1	110,0	0,7	1,0		4	4		0,13	±0,13			n.i.O.
A21	09 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	ohne	1	110,0	0,7	1,0		4	4		0,16	±0,13			n.i.O.

**Tabelle 4.10.** Kriterien zur Bewertung des Anziehens mit DTI**Table 4.10.** Criteria for the evaluation of tightening with DTI

Schraubenkraft $F_S$	Anzahl der Sperrweiten $n_{\text{refusal}}$	
	$\leq \frac{1}{2} n_{\text{gap}}$	$> \frac{1}{2} n_{\text{gap}}$
$> F_{p,C} (+1\%)$	i.O.	Schritt $i > 1$ : i.O. Schritt $i = 1$ : k.A.
$= F_{p,C} (+1\%)$	i.O.	n.i.O.
$< F_{p,C}$	Anziehen fortsetzen (n.i.O.)	n.i.O.
Fühllehren-Kriterium	nicht erreicht	erreicht
i.O.	in Ordnung	
n.i.O.	nicht in Ordnung	
k.A.	keine Angabe (eindeutige Bewertung nicht möglich)	

**Tabelle 4.11.** Montagevorspannkkräfte bei Erreichen des Fühllehren-Kriteriums, Serien M20**Table 4.11.** Assembly preloads upon reaching the feeler gauge criterion, M20 series

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Prüfung Nr.	DTI Nr.	Montage-konfiguration	erf. Fühllehre [mm]	Schmierung	Anziehschritt zu $F_S$	$F_S$ [kN]	$F_S / F_{ub}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	$F_S / F_{p,C} - 1$	$n_{\text{refusal}}$ [-]	$n_{\text{gap}}$ [-]	$n_{\text{refusal}} / n_{\text{gap}}$	$h_{\text{gap},m}$ [mm]	$R/2$ [mm]	$h_{\text{gap},m}$	$h_{\text{gap},inf}$	Bewertung
<b>M20 – H8 – AND-A2</b>																	
A53	6	Shr.fix	0,4	K1	4	142,9	0,73	1,04		4	5		0,33 ±0,1				i.O.
A54	7	Shr.fix	0,4	K1	4	142,5	0,73	1,04		3	5		0,39 ±0,07				i.O.
A55	8	Shr.fix	0,4	K1	4	142,6	0,73	1,04		3	5		0,37 ±0,09				i.O.
A56	19	Mu.rot	0,25	K1	5	146,7	0,75	1,07		3	5		0,21 ±0,14				i.O.
A57	20	Mu.rot	0,25	K1	5	146,7	0,75	1,07		3	5		0,23 ±0,1				i.O.
A58	21	Mu.rot	0,25	K1	5	146,6	0,75	1,07		3	5		0,2 ±0,1				i.O.
A59	22	Mu.rot	0,25	K1	4	142,6	0,73	1,04		3	5		0,27 ±0,16				i.O.
A60	23	Mu.rot	0,25	K1	6	155,4	0,79	1,13		4	5		0,14 ±0,14				i.O.
<b>M20 – H10 – TS-22AA</b>																	
A61	11 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	K1	2	160,0	0,65	0,93		4	6		0,26 ±0,28				n.i.O.
A62	12 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	K1	2	160,0	0,65	0,93		5	6		0,29 ±0,15				n.i.O.
A63	13 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	K1	3	172,0	0,7	1,0		4	6		0,27 ±0,25				n.i.O.
A64	14 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	ohne	2	160,0	0,65	0,93		4	6		0,33 ±0,21				n.i.O.
A65	15 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	ohne	Bruch					–	6		–	–			
A66	16 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	ohne	2	160,0	0,65	0,93		4	6		0,27 ±0,25				n.i.O.
A67	05 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	K1	4	206,0	0,84	1,2		6	6		0,15 ±0,13				i.O.
A68	06 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	K1	3	195,0	0,8	1,14		4	6		0,18 ±0,2				i.O.
A69	07 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	K1	3	195,0	0,8	1,14		4	6		0,23 ±0,14				i.O.
A70	08 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	ohne	2	183,0	0,75	1,07		4	6		0,16 ±0,2				i.O.
A71	09 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	ohne	3	195,0	0,8	1,14		4	6		0,17 ±0,2				i.O.
A72	10 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	ohne	3	195,0	0,8	1,14		4	6		0,19 ±0,2				i.O.

Falls die Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  (+1 %) gerade so erreicht ist und das Fühllehren-Kriterium ebenso erfüllt ist, ist eine genaue Bewertung nur unter Berücksichtigung der gemittelten Höhe  $h_{gap,m}$  aller Spalte möglich. Ohne diese Größe zu kennen sollte die Bewertung auf der sicheren Seite mit „n.i.O.“ (nicht in Ordnung) erfolgen. Eine normative Regelung ist entsprechend EN 14399-9 für diesen Fall nicht formuliert, vgl. Kapitel 3.5.3.2. Ist das Fühllehren-Kriterium erfüllt und damit das Erreichen der Mindestvorspannkraft angezeigt, so darf die tatsächliche Vorspannkraft nicht unter der Mindestvorspannkraft liegen. Ansonsten lautet die Bewertung ebenso „n.i.O.“.

In Tabelle 4.9 sind die erzielten Montagevorspannkraften bei Erreichen des Fühllehren-Kriteriums der Anziehversuche der Serien M16 zusammengestellt, in Tabelle 4.11 diejenigen der Serien M20. Es handelt sich hierbei um die zusammenfassende Darstellung der einzelnen Versuche, die in Anhang B.1 analog zu Tabelle 4.7 ausführlich dokumentiert sind. Die Überführung der individuellen Ergebnisse eines Versuchs (analog zu Tabelle 4.7) in die zusammenfassende tabellarische Darstellung (analog zu Tabelle 4.9) wird anhand von Beispielen für Bauteil-Zugversuche in Kapitel 4.5.4.2 ausführlich erläutert.

Zwischen den Ergebnissen der Drucklastversuche entsprechend Tabelle 4.4 und denen der Anziehversuche sind hinsichtlich der Bewertung deutliche Unterschiede vorhanden. Die Serien M16–H8 und M20–H10 erfüllten im Drucklastversuch die Anforderungen an die Anzeigerdrucklast. In den Anziehversuchen der Montagekonfiguration *Shr.fix* konnte allerdings keine positive Bewertung erzielt werden, siehe Tabellen 4.9 und 4.11. In der Konfiguration *Mu.rot* konnte hingegen für das Fühllehren-Kriterium eine ausreichend hohe Vorspannkraft nachgewiesen werden.

Für die Serie M16–H10–A10 sind die Ergebnisse einheitlich negativ zu bewerten. Dagegen führten die Anziehversuche der Serie M20–H8 in beiden Montagekonfigurationen zu positiven Bewertungen, so wie ebenfalls die Drucklastversuche.

#### 4.4.3.3 Last-Verformung-Verhalten des DTI im Anziehvorgang

Das Last-Verformung-Verhalten des DTI wurde durch das Ausmessen der Spalte mit einer Palette von Fühllehren bestimmt. Die entsprechend den Tabellen 4.7, 4.8 und ähnlichen in Anhang B.1 dokumentierten gemittelten Höhen  $h_{gap,m}$  der Spalte sind in Form der Spalt-Kraft-Kurven in den Bildern 4.33 und 4.34 dargestellt. Die Bewertungen entsprechend den Tabellen 4.9 und 4.11 werden damit

bestätigt. Bei Erreichen des maßgebenden festgelegten Spaltes – 0,4 mm (*Shr.fix*) oder 0,25 mm (*Mu.rot*) – muss die Schraubenkraft über der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  liegen. Dies ist nicht für alle Serien und Montagekonfigurationen gegeben.

Der Vergleich der Spalt-Kraft-Kurven der einzelnen Serien aus den Drucklast- und Anziehversuchen in den Bildern 4.35 bis 4.38 liefert folgende Erkenntnisse:

- bei identischer Höhe des Spaltes – gemessen mit der Lehre bzw. dem Wegaufnehmer im Drucklastversuch und der Palette von Fühllehren im Anziehversuch – ist die zugehörige Kraft beim Anziehen der Garnitur geringer als im Drucklastversuch, das Abplatten der Überstände erfolgt also bei gleicher Druckkraft „schneller“;
- die Streuungen unterschiedlicher Versuche innerhalb einer Serie und Montagekonfiguration sind beim Anziehen einer Garnitur wesentlich größer als in Drucklastversuchen an einzelnen DTI,
- das Last-Verformung-Verhalten unterschiedlicher Montagekonfigurationen kann innerhalb einer Serie voneinander abweichen.

Diese Befunde beruhen mit großer Wahrscheinlichkeit ursächlich auf zwei wesentlichen Unterschieden zwischen dem Drucklast- und Anziehversuch. Im Anziehversuch sind zum einen Exzentrizitäten und Schiefstellungen der Auflageflächen innerhalb der Garnitur im Kontakt mit dem DTI unvermeidbar, aufgrund der geometrischen Toleranzen der Komponenten, der ungleichmäßigen Flächenpressung in der Auflagefläche der Mutter infolge der Gewindesteigung und dem manuellen Einbau der Garnitur in horizontaler Lage. Grundsätzlich können zusätzlich Querkräfte bzw. Abstützkräfte eines Anziehgerätes hinzukommen, die in der vorliegenden Versuchsdurchführung allerdings ausgeschlossen werden können. Zum anderen kann die Verdrehung der Scheibe auf den Überständen des DTI zum Abtrag der Überstände beitragen. Eine Eindrückung der Überstände in vertieft eingeprägte Markierungen der Scheibe kommt womöglich noch hinzu.

Somit muss die Anzeigerdrucklast als Ergebnis des Drucklastversuchs in der Regel signifikant über der Mindestvorspannkraft liegen, damit auch der Anziehversuch für die Serie unter den gegebenen Anforderungen erfolgreich absolviert werden kann.

Das vollständige Abplatten der Überstände bzw. Schließen der Spalte konnte im Anziehversuch auch durch Anwendung der Fühllehren festgestellt werden, siehe

Bilder 4.35 bis 4.37. Nur für die Serie M20–H10 war die Anzahl der Messintervalle nicht ausreichend, um dies bei den vorhandenen großen Schraubenkräften festzustellen, siehe Bild 4.38. Es besteht eine gute Übereinstimmung zwischen dem Abknicken der Spalt-Druckkraft-Kurven aus den Drucklastversuchen und dem festgestellten Schließen der Spalte mit Fühllehren in den Anziehversuchen hinsichtlich der dazu benötigten Druckkraft bzw. Schraubenkraft.

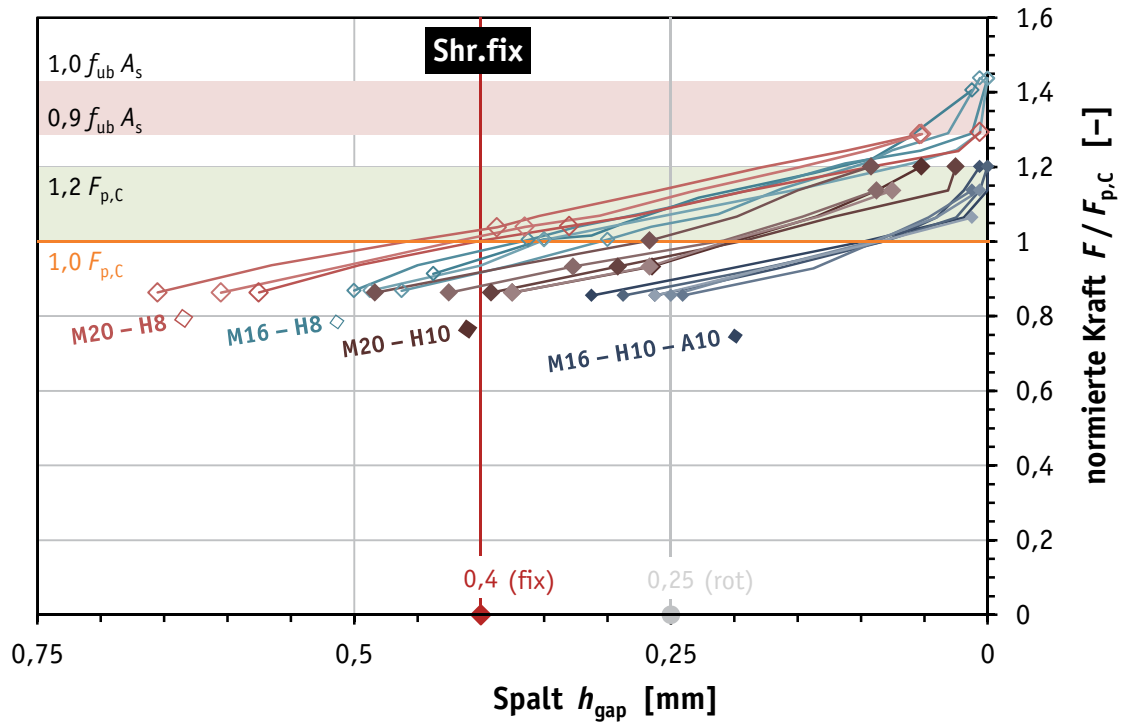
Der Drucklastversuch ist dazu geeignet, das vollständige Abplatten der Überstände und die dazu erforderliche Druckkraft zu ermitteln. Er liefert eine leicht konservative Abschätzung gegenüber dem Ausmessen mit Fühllehren beim Anziehen und ist zudem in der Ausführung wesentlich einfacher.

Das Abknicken der Spalt-Druckkraft-Kurven mit großem Zuwachs des Gradienten fällt allerdings nicht exakt auf den Nullpunkt der Skala für die Höhe des Spaltes. Dies liegt am regulären Prüfablauf des Drucklastversuchs, in dem der Abgleich der Spalt-Druckkraft-Kurve unter einer Drucklast in Höhe der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  auf einer äußeren kreisringförmigen Fläche erfolgt, vgl. Kapitel 4.3.2. Für eine einfache Versuchsdurchführung des Drucklastversuchs mit einer manuell ablesbaren Lehre ist diese Vorgehensweise anscheinend bewährt. Die Auswirkungen werden hier erst durch die kontinuierliche Erfassung der Spalt-Druckkraft-Kurve, die höheren aufgebrachten Drucklasten und den direkten Vergleich zum Anziehversuch mit der Anwendung von Fühllehren sichtbar.

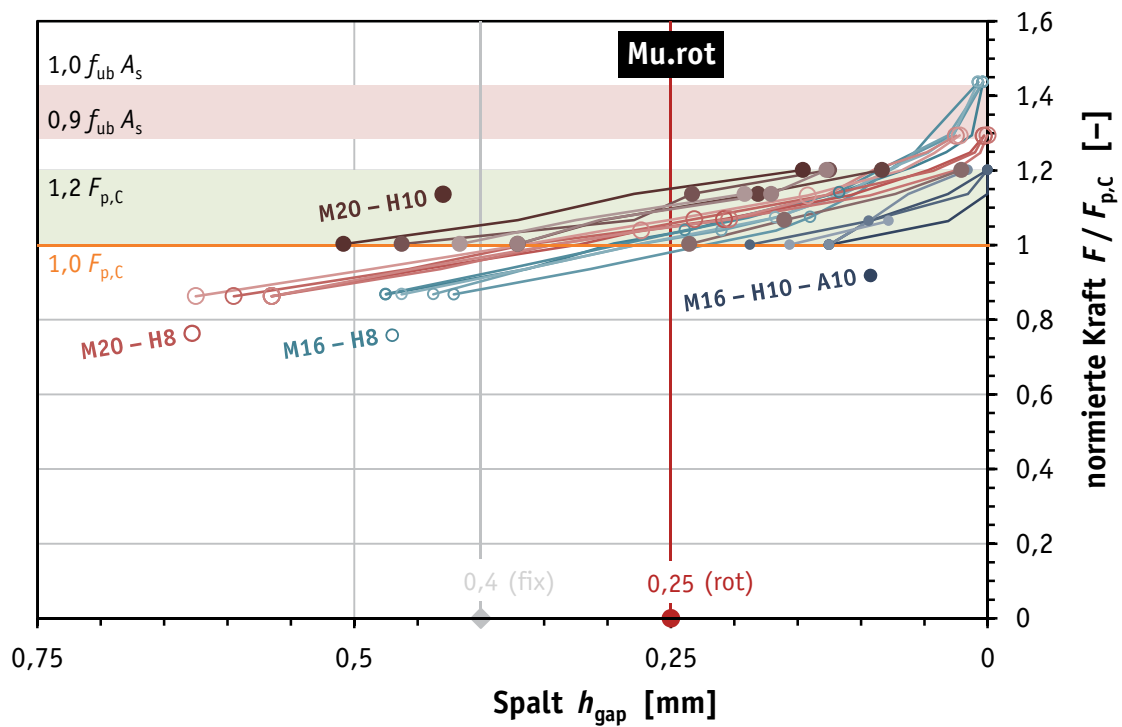
Die zweistufige Prüfung der Gebrauchseignung des direkten Kraftanzeigers nach EN 14399-9 – das *Prüfverfahren für die Messung der Druckbelastung (alle Oberflächenausführungen) von direkten Kraftanzeigern* (Drucklastversuch) und die *Prüfung der Eignung zur Feststellung der Schraubenkraft* (Anziehversuch) – kommt auch ohne eine noch bessere Übereinstimmung der beiden Versuchsarten hinsichtlich des Abgleichs der Höhe  $h_{gap}$  des Spaltes der Spalt-Druckkraft-Kurven aus. Das ungünstigere Ergebnis muss schließlich die Anforderungen erfüllen. Die durchgeführten Untersuchungen deuten darauf hin, dass dies in der Regel mit der *Prüfung der Eignung zur Feststellung der Schraubenkraft*, d.h. dem Anziehversuch erzielt werden muss. Dem Anziehversuch kommt daher die größere Bedeutung im Vergleich zum Drucklastversuch zu.

Die Definition und der Abgleich der Spalt-Druckkraft-Kurve aus dem Drucklastversuch wird im Zuge der Modellbildung mit direkten Kraftanzeigern erneut aufgegriffen und für die dortigen Zwecke modifiziert und bewertet, vgl. Kapitel 5.2.5.3.

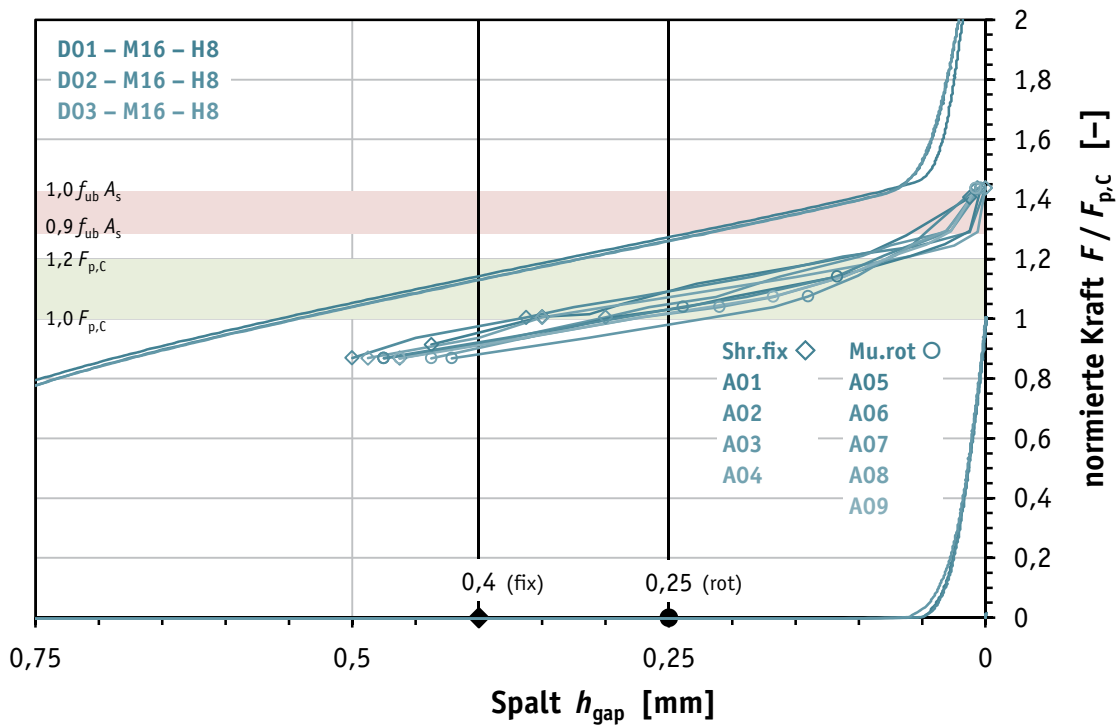




**Bild 4.33.** Spalt-Kraft-Diagramm für Anziehversuche in der Montagekonfiguration Shr.fix  
**Figure 4.33.** Gap-load-diagram for the tightening tests of the configuration Shr.fix

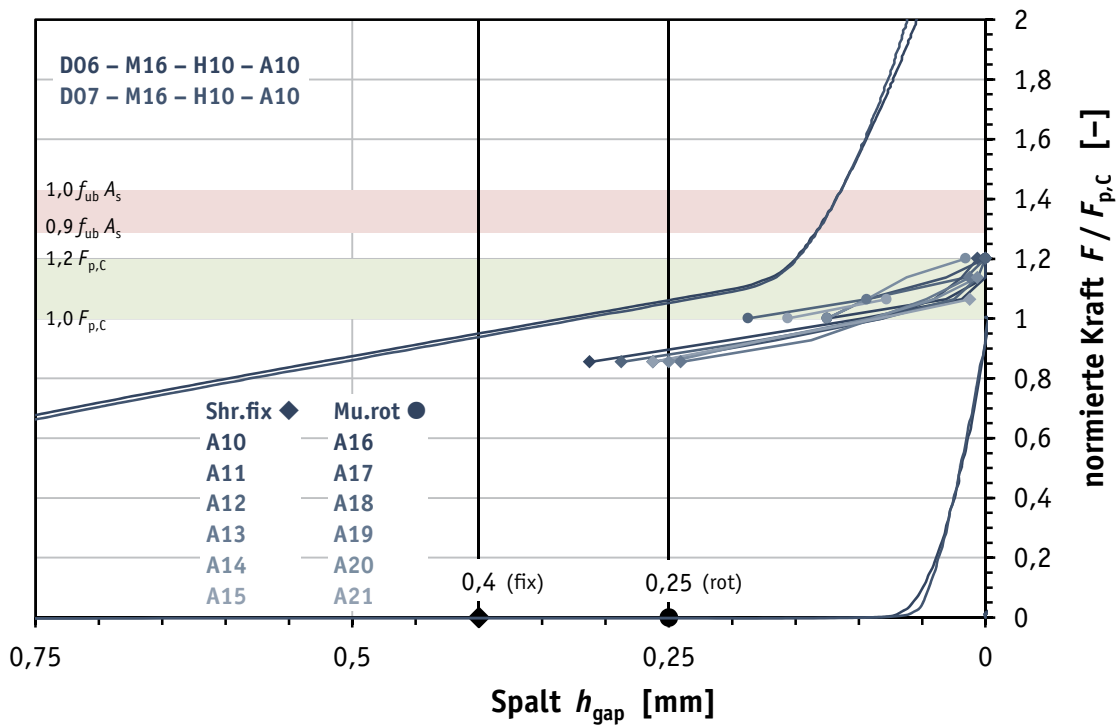


**Bild 4.34.** Spalt-Kraft-Diagramm für Anziehversuche in der Montagekonfiguration Mu.rot  
**Figure 4.34.** Gap-load-diagram for the tightening tests of the configuration Mu.rot



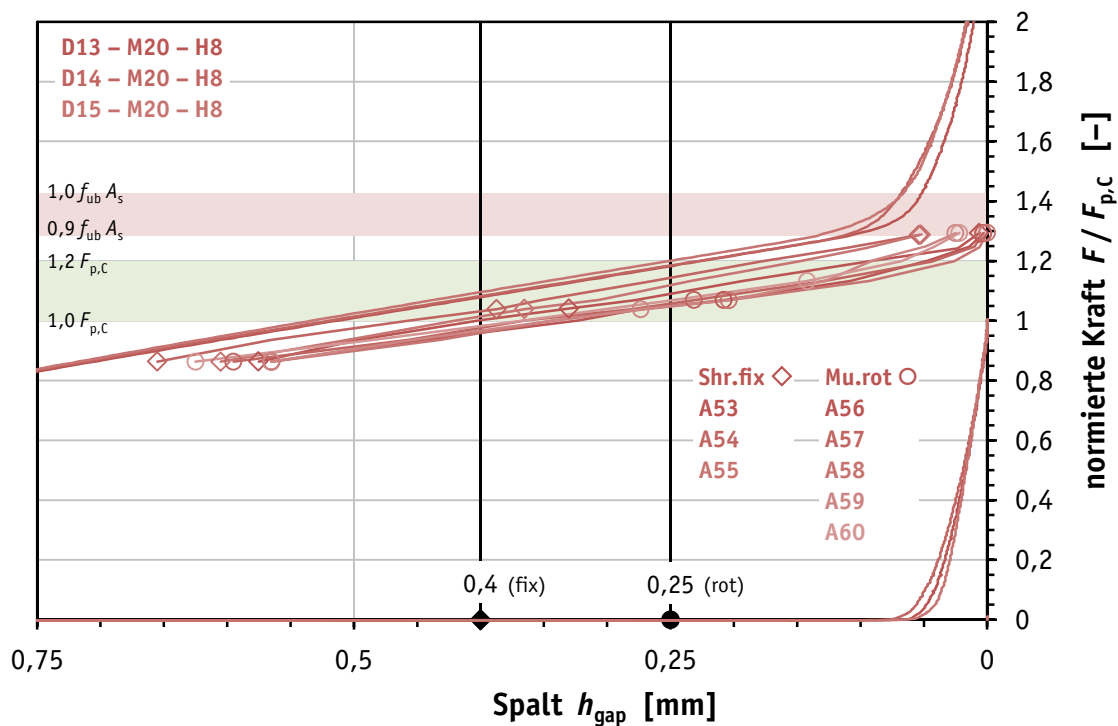
**Bild 4.35.** Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M16-H8-AND-A1 (Av und Dv im Vergleich)

**Figure 4.35.** Gap-load-diagram for M16-H8-AND-A1 series (Av and Dv in comparison)



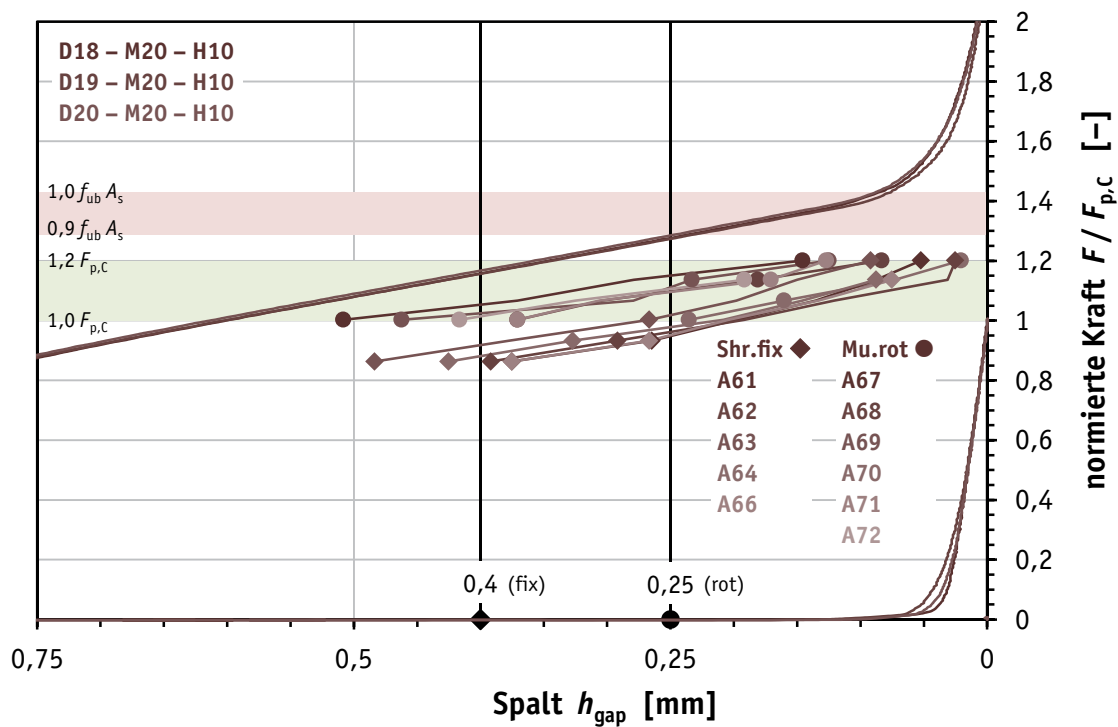
**Bild 4.36.** Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M16-H10-TS-A10 (Av und Dv im Vergleich)

**Figure 4.36.** Gap-load-diagram for M16-H10-TS-A10 series (Av and Dv in comparison)



**Bild 4.37.** Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M20-H8-AND-A2 (Av und Dv im Vergleich)

**Figure 4.37.** Gap-load-diagram for M20-H8-AND-A2 series (Av and Dv in comparison)



**Bild 4.38.** Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M20-H10-TS-22A (Av und Dv im Vergleich)

**Figure 4.38.** Gap-load-diagram for M20-H10-TS-22A series (Av and Dv in comparison)

## 4.5 Zugversuche an vorgespannten Verbindungen mit direkten Kraftanzeigern

### 4.5.1 Allgemeines und Fragestellungen

Bei der Montage wird die Vorspannkraft in der Verbindung durch ein definiertes Anziehverfahren hergestellt. Um die tragfähigkeits- und/oder gebrauchstauglichkeitsrelevante Mindestvorspannkraft über die gesamte Lebensdauer des Tragwerks sicherzustellen, ist bei der Montage eine höhere Montagevorspannkraft zu erzielen. So können unvermeidbare Vorspannkraftverluste, die durch Setzen, Kriechen oder Rückfederung auftreten, kompensiert werden. Diese Vorspannkraftverluste treten in der Regel auch ohne äußere mechanische Beanspruchung auf.

Eine Zugbeanspruchung der vorgespannten Verbindung bewirkt eine Vergrößerung der Schraubenkraft über die vorhandene Vorspannkraft hinaus, siehe Bild 2.4. Bei wiederholten Lastwechseln ist so ein weiterer Vorspannkraftverlust durch selbsttätiges Losdrehen möglich. Falls die Schraubenkraft unter Betriebsbeanspruchung die zuvor eingebrachte Montagevorspannkraft übersteigt, sind zusätzliche Vorspannkraftverluste durch Setzen und Kriechen zu erwarten, die durch die Vergrößerung der Flächenpressungen in den Kontaktfugen an Bauteilen und Verbindungselementen auftreten.

Das derzeitige Regelwerk zur Bemessung und Konstruktion (EN1993-1-8, ergänzt durch EN1993-1-9) sowie Ausführung (EN1090-2) von Stahlbauten berücksichtigt das Anziehverfahren mit direkten Kraftanzeigern gleichwertig neben anderen Anziehverfahren ohne besondere Einschränkung des Anwendungsbereichs hinsichtlich der Beanspruchung und Beanspruchbarkeit der vorgespannten Schraubenverbindung. Grundsätzlich sind die geregelten Anziehverfahren, einschließlich des Anziehverfahrens mit direkten Kraftanzeigern, für alle Kategorien von Schraubenverbindungen und damit für alle Beanspruchungsarten zugelassen. Der Einsatz von direkten Kraftanzeigern in gleitfesten, d.h. scherbeanspruchten Verbindungen der Kategorien B und C ist vielfach untersucht und in der Literatur dokumentiert worden, siehe Kapitel 3. Für den Einsatz des DTI unter Zugbeanspruchung liegen nur geringfügige Erkenntnisse zum Tragverhalten und zu möglichen Vorspannkraftverlusten vor, siehe [SI82] sowie Kapitel 3.3.2. Die nachfolgenden Untersuchungen füllen diese Lücke.

## Fragestellungen

Die Zugversuche an vorgespannten Verbindungen mit direkten Kraftanzeigern sollen einen Beitrag zur Klärung folgender Fragestellungen leisten:

- Wie groß sind die anfänglichen Vorspannkraftverluste durch Setzen ohne äußere Beanspruchung unter Verwendung des DTI?
- Welche Auswirkung haben Schraubenzusatzkräfte aus äußerer Zugbeanspruchung auf die vorgespannte Verbindung mit DTI?
- Ist das Last-Verformung-Verhalten des DTI in der Schraubenverbindung vergleichbar mit dem Verhalten des DTI im Drucklastversuch?

### 4.5.2 Messung der Schraubenkraft

#### 4.5.2.1 Allgemeines

Die Vorspannkraft in der Verbindung muss sowohl zur Beurteilung des Anziehvorgangs als auch zur Erfassung der Einflüsse aus äußeren Beanspruchungen gemessen werden. Im vorangegangenen Kapitel 4.4 wurde die Vorspannkraft in der Schraube mittels eines Vorspannkraft-Sensors gemessen, der in seiner Bauart einem Kraftaufnehmer mit intern angeordneten Dehnungsmessstreifen ähnelt. Der Kraftfluss und die Steifigkeiten innerhalb des Sensors sind allerdings nicht mit denen realer verschraubter Bauteile vergleichbar. Zudem ist eine Einleitung einer äußeren Zugbeanspruchung in den Sensor nicht möglich. Die weitere Verwendung des Vorspannkraft-Sensors zur Ermittlung von zeitlich- und beanspruchungsbedingten Vorspannkraftverlusten ist daher ausgeschlossen.

#### 4.5.2.2 Auswahl des Messverfahrens

Für die Messung von Vorspannkräften in Schraubenverbindungen sind unterschiedliche Verfahren verfügbar. Dabei wird die Vorspannkraft in der Regel indirekt über eine weitere physikalische Größe bestimmt. Der Zusammenhang zwischen der Kraft und der Hilfsgröße muss hinreichend genau bekannt sein. Die Bestimmung von Vorspannkraftänderungen und Vorspannkraftverlusten erfordert in hohem Maße das Beibehalten der ursprünglichen Geometrien bzw. Steifigkeiten von Bauteilen und Verbindungselementen.

Folgende Messverfahren konnten unter Berücksichtigung der Originalgeometrie der Schraubenverbindung bzw. mit geringfügigen Modifikationen derer für die vorliegende Messaufgabe in Betracht gezogen werden:

- Messung der mechanischen Längenänderung der Schraube zwischen Kopf und Gewindeende mittels Messschraube oder Extensometer,
- Messung der Änderung der axialen Ultraschall-Laufzeit innerhalb der Schraube durch Sender und Empfänger am Schraubenkopf,
- Messung der elektrischen Widerstandsänderung von aufgeklebten oder implantierten Dehnungsmessstreifen (DMS) am oder im Schraubenschaft.

Nachfolgende Verfahren zur Messung der Schraubenkraft waren für die Messaufgabe nicht geeignet, da die Anordnung dieser separaten Sensoren eine Anpassung der Geometrie des Klemmpakets sowie eine reproduzierbare und gleichförmige Lasteinleitung in den Sensor erfordert. Es handelt sich dabei um den Einsatz von

- Kraftaufnehmern oder Kraftmessringen auf Basis von DMS,
- Kraftmessringen als messende Unterlegscheibe unter Nutzung von piezoelektrischen oder piezoresistiven Effekten.

Grundsätzlich erfordern die drei erstgenannten Verfahren eine mechanische Bearbeitung der Schraube, zumeist durch Bohren und/oder Abdrehen. Da die kontinuierliche Aufzeichnung der Schraubenkraft für den Anziehvorgang und die Belastungsphase erforderlich war, konnte die manuelle Messung der mechanischen Längenänderung unter anderem deshalb nicht eingesetzt werden.

Die Ultraschall-Verfahren zur Bestimmung der Schraubenkraft lassen sich in zwei Varianten unterscheiden. Zum einen ist die Verwendung eines signalgebenden und -empfangenden Prüfkopfs möglich, der mit einem Koppelmedium zur Übertragung der Schallwellen in der Regel wiederablösbar aufgesetzt wird. Zum anderen ist ein permanenter Sensor auf der Schraube ausführbar, der an der Koppelstelle zum Messgerät elektrische Spannungen und keine Schallwellen überträgt. Diese Verfahren wurden aufgrund von mangelnder Verfügbarkeit und Kompatibilität zur sonstigen Messtechnik nicht eingesetzt.

Für die Messaufgabe war es nicht erforderlich, eine Biege- oder Torsionsbeanspruchung der Schraube zu erfassen. In der zu betrachtenden zentrisch verspannten und zentrisch beanspruchten Verbindung können zwar Exzentrizitäten der Lasteinleitung, geometrische Imperfektionen der Verbindungselemente im zulässigen Toleranzbereich und eine ungleichförmige Abplattung des DTI nicht gänzlich ausgeschlossen werden, doch ist die hieraus resultierende Biegebeanspruchung im vorliegenden Fall von untergeordneter Bedeutung. Die Erfassung einer

Torsionsbeanspruchung war ebenso nicht erforderlich, da die absolute tatsächliche Tragfähigkeit der Schraubengarnitur nicht in Anspruch genommen werden musste.

Die Verwendung von implantierten Bolzen-DMS eignet sich besonders zur Messung der reinen Schraubenkraft, da der Bolzen-DMS mit seiner Lage in der Biege- und Drillruheachse der Schraube fast ausschließlich Dehnungen infolge der zentrischen Schraubenkraft erfährt. Prinzipiell wurde dieses Verfahren mit implantierten Dehnungsmessstreifen schon von VALTINAT [VH95] insbesondere bei Langzeitmessungen untersucht und für tauglich befunden.

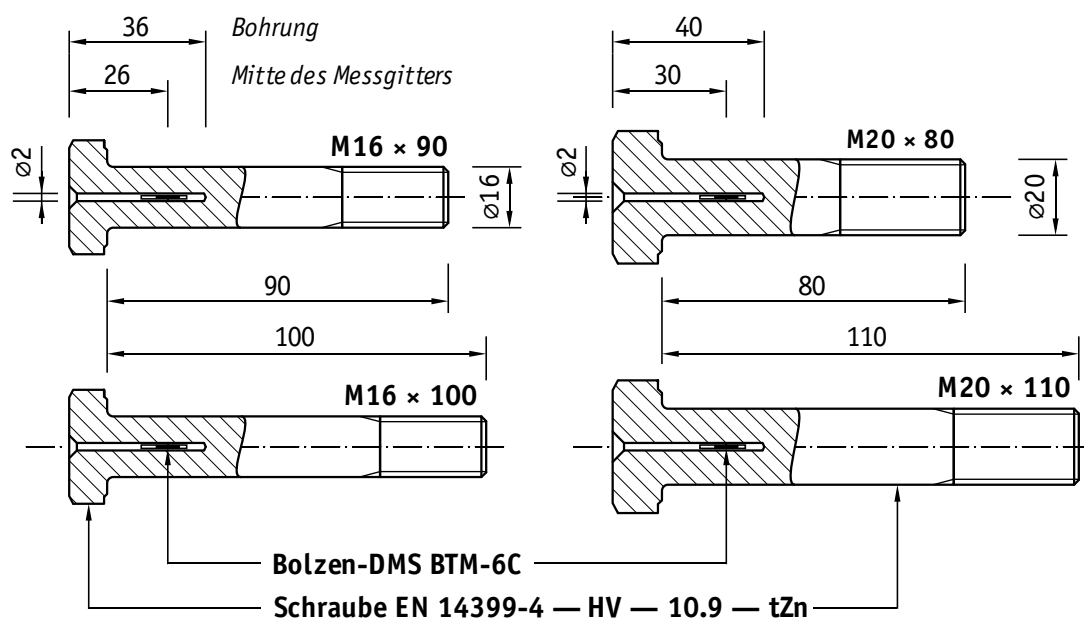
Zur Messung der Schraubenkraft wurde daher das Verfahren mit implantierten Dehnungsmessstreifen ausgewählt. Die zur Verfügung stehende messtechnischen Ausrüstung und die vorliegenden Anwendungserfahrungen – siehe z.B. [SBA14], [SSG14] und [SSG13] – waren zusätzliche Entscheidungsfaktoren. Es erwies sich als vorteilhaft, dass die Herstellung und Kalibrierung der Prüfschrauben im eigenen Hause durchgeführt werden konnte, mit universellen Messverstärkern mehrere Prüfschrauben gleichzeitig überwacht werden konnten und die Kompatibilität zur synchronen Messdatenaufzeichnung mit der Zug-Prüfmaschine gegeben war.

Die Messung von Schraubenkräften mittels implantierter oder aufgeklebter Dehnungsmessstreifen ist im Bereich der Prüfung und Überwachung von vorgespannten Verbindungselementen etabliert. So setzten ebenso VALTINAT [VAD93], STEURER [St99], VELJKOVIC [VFN10], FRIEDE [Fr10] und GLIENKE [Gl13] in Untersuchungen vorgespannter Verbindungen implantierte Dehnungsmessstreifen ein. HADRYCH [Ha01], SEIDEL [Se01], JAKUBOWSKI [Ja03] und RUTKOWSKI [Ru12] nutzten zur Bestimmung der Vorspannkraft und der Biegebeanspruchung, teilweise auch der Torsionsbeanspruchung, mehrere Dehnungsmessstreifen je Schraube, die verteilt auf dem Schraubenschaft aufgeklebt waren. Die genannten Anwendungen der Dehnungsmessstreifen beziehen sich allesamt auf stahlbautypische Schraubenabmessungen, d.h. Gewindedurchmesser nicht kleiner als M12, in der Mehrzahl noch deutlich darüber. Bei diesen Abmessungen trägt eine mechanische Bearbeitung der Schraube durch Bohrungen oder das geringfügige Abdrehen des zumeist vorhandenen Schaftes kaum zur Veränderung der Steifigkeitsverhältnisse bei. Auch die Kabelzuführung ist bei den gegebenen Abmessungen realisierbar.

Bei deutlich kleineren Schraubenabmessungen des Maschinenbaus können die zum Einsatz von Dehnungsmessstreifen nötigen Bearbeitungen der Schraube nicht tolerierbare Größenordnungen annehmen. DUCHARDT [Du13] wählte für die Überwachung der Vorspannkraft in Schrauben der Größe M8 das Ultraschall-Messverfahren. Auch RUTKOWSKI [Ru12] führte vergleichende Untersuchungen mit dem Ultraschall-Messverfahren bei Schrauben der Größe M20 durch, entschied sich allerdings bei der überwiegenden Anzahl von Feldmessungen für die manuelle Messung der mechanischen Längenänderung. Die manuelle Anwendung von Messuhren oder Messschrauben findet sich auch bei BOUWMAN [Bo79], GRUINTJES [GB84] und KATZUNG [KPS96].

#### 4.5.2.3 Ausführung der Dehnungsmessstreifen in Prüfschrauben

Die Prüfschrauben wurden mit Bolzen-DMS des Typs BTM-6C, hergestellt von der TOKYO SOKKI KENKYUJO CO. LTD., instrumentiert. Dazu wurde der Bolzen-DMS in eine zentrische und axiale Bohrung durch den Schraubenkopf in den Schaft eingebracht und mit dem zugehörigen Zwei-Komponenten-Klebstoff vergossen. Die Handhabung und Aushärtung des Klebstoffs entsprach den Vorgaben des Herstellers. Die Bohrung hatte einen Durchmesser von 2 mm. Bild 4.39 zeigt die Tiefe der Bohrung sowie die Lage des Messgitters des DMS für die verwendeten Prüfschrauben.



**Bild 4.39.** Lage des Bolzen-DMS im Schraubenschaft

**Figure 4.39.** Position of the bolt strain gauge within the bolt shank



Die Bohrung in Kopf und Schaft der Prüfschrauben verursacht eine Schwächung der beiden entsprechenden Querschnitte, so dass prinzipiell die zugehörigen Steifigkeiten verringert bzw. die Nachgiebigkeiten vergrößert werden. In Tabelle 4.12 sind die Querschnittsschwächungen des Schaftes der Schraubengrößen M16 und M20 zusammengestellt. Durch die Bohrung mit einem Durchmesser  $d_L$  von 2 mm ergeben sich Reduktionen der Querschnittsfläche von 1,6 % (M16) und 1,0 % (M20). Für die Beurteilung der Schraubenkraft in der vorgespannten und beanspruchten Verbindung ist die Änderung des Schaftquerschnitts vernachlässigbar, zumal die Schwächung über eine begrenzte Länge erfolgte, siehe Bild 4.39. Für den deutlich voluminöseren Schraubenkopf ist die Schwächung durch die Bohrung ebenso vernachlässigbar.

**Tabelle 4.12.** Querschnittsschwächung der Prüfschrauben mit implantierten DMS

**Table 4.12.** Cross-sectional weakening of the measuring bolts with implanted strain gauges

Gewinde	$d$ [mm]	$A_{Sch}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_L$ [mm]	$A_L$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{Sch,net}$ [mm <sup>2</sup> ]	$(A_{Sch,net} / A_{Sch}) - 1$ [%]
M16	16	201	2,0	3,1	198	-1,6 %
M20	20	314	2,0	3,1	311	-1,0 %

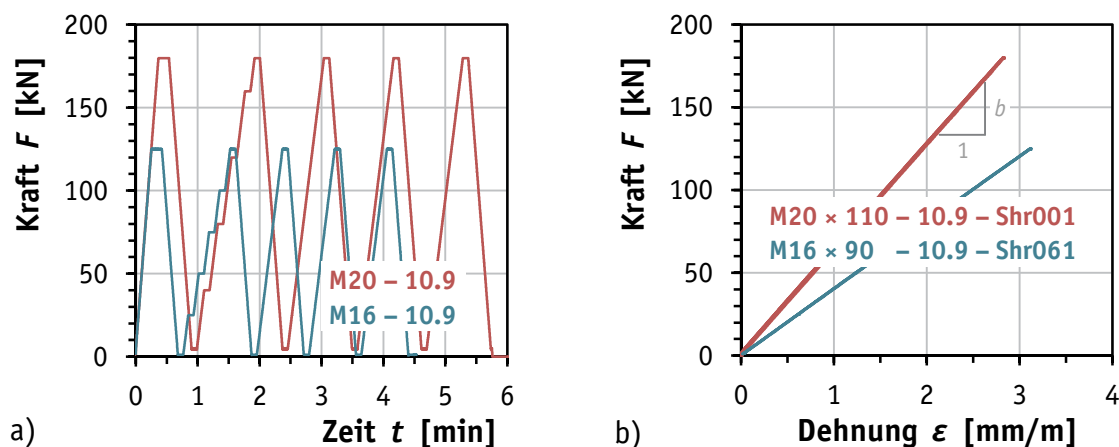
Der elektrische Anschluss der Prüfschrauben erfolgte in 4-Leiter-Technik, mit der Widerstandsänderungen der Zuleitungen kompensiert werden. Der Temperatureinfluss auf den Dehnungsmessstreifen selbst, der als Bestandteil der Wheatstone-Viertelbrücke fungiert, ist damit noch nicht berücksichtigt. Eine zusätzliche, unbelastete Prüfschraube wurde in die Brückenschaltung einbezogen, so dass Änderungen der Temperatur der Prüfschrauben während der Überwachungs- und Prüfphase die Messergebnisse der mechanischen Längenänderung nicht beeinträchtigten.

#### 4.5.2.4 Kalibrierung der Prüfschrauben

Aufgrund der direkten Messung einer physikalischen Hilfsgröße, nämlich der elektrischen Widerstandsänderung bzw. der zu dieser proportionalen Dehnung des Messgitters, ist eine Kalibrierung einer jeden Prüfschraube erforderlich. Insbesondere ist dies für implantierte Bolzen-DMS nötig, da das Einbetten in den Verguss-Klebstoff nicht immer frei von Exzentrizitäten innerhalb der Bohrung und damit verbundener inhomogener Dehnung des Messgitters ist. Ferner können gasförmige Einschlüsse die Dauerhaftigkeit der Klebverbindung beeinträchtigen.

gen. Fehlerhafte Klebverbindungen können anhand einer Beanspruchung der Prüfschraube, zum Beispiel in einem Kalibrierablauf, erkannt werden. Für eine verwendbare Prüfschraube ist ein dauerhaft linearer Zusammenhang zwischen Beanspruchung und angezeigter Dehnung erforderlich. Nichtlineare und hystere-tische Verläufe der Dehnung-Kraft-Kurven, schlagartige Differenzen im Messsig-nal und Kriecheffekte der Verklebung lassen sich im Kalibrierablauf erkennen und entsprechende Schrauben aussortieren.

Der gewählte mehrstufige Kalibrierablauf ist in Bild 4.40 (a) dargestellt. Die instrumentierten Schrauben wurden in einer servohydraulischen Zug-Druck-Prüfmaschine (Nennlast  $\pm 200$  kN) des Instituts für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen mit einer Zugkraft belastet. Aus linearen Regressi-onsanalysen der Dehnung-Kraft-Kurven wurden der Regressionskoeffizient  $b$  so-wie das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  für jede Prüfschraube ermittelt, siehe exemplarisch Bild 4.40 (b). Der Regressionskoeffizient  $b$  wurde für den nachfolgenden Einsatz der Prüfschraube als Proportionalitätsfaktor zwischen der Dehnung des Bolzen-DMS und der Schraubenkraft verwendet. Der weitere Regressionsfaktor  $a$  (Ordi-natenabschnitt) wurde nicht benötigt, da ein Tarieren der vorliegenden Messsig-nale auf null vor jeder Anwendung obligatorisch ist. Die Dehnung-Kraft-Dia-gramme der verwendeten Prüfschrauben sind in Anhang C.1, Bild C.1 dargestellt. In Tabelle C.1 sind die zugehörigen Regressionskoeffizienten  $b$  und Bestimm-theitsmaße  $R^2$  zusammengestellt.



**Bild 4.40.** Kalibrierablauf für Prüfschrauben M16 und M20, Zeit-Kraft-Diagramm (a) und Dehnung-Kraft-Diagramm (b)

**Figure 4.40.** Calibration sequence for measuring bolts M16 and M20, time-load-diagram (a) and strain-load-diagram (b)

### 4.5.3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

#### 4.5.3.1 Allgemeines

Zur experimentellen Untersuchung des Tragverhaltens der vorgespannten Schraubengarnitur mit DTI unter Zugbeanspruchung ist es sowohl erforderlich, den Montageprozess mit dem geregelten Anziehverfahren als auch die Betriebsbeanspruchung reproduzierbar durchzuführen. Die verschiedenen Aufnahmevorrichtungen für die Zugbeanspruchung von Verbindungselementen, wie sie in der Materialprüfung entweder im Zugversuch nach ISO 898-1 oder im Schwingfestigkeitsversuch nach DIN 969 Verwendung finden, sind für die Prüfung einer vorgespannten Verbindung nur bedingt geeignet. Daher wurde eine Aufnahmevorrichtung entsprechend Bild C.2 entwickelt, die unter Ausnutzung der vorhandenen Nennlast der Prüfmaschine von 200 kN die folgenden Anforderungen erfüllt:

- Aufnahme eines vorgespannten Bauteils, das bereits vollständig und unabhängig von dieser Vorrichtung montiert ist,
- Minimierung der Mindestklemmlänge des vorgespannten Bauteils,
- händische und visuelle Zugänglichkeit von Schraubenkopf und Mutter,
- visuelle Zugänglichkeit der Trennfuge der vorgespannten Einzelteile und
- axial zentrische Lasteinleitung der äußeren Zugbeanspruchung.

Mit den Bauteil-Zugversuchen sollen zum einen weitere Erkenntnisse über das Anziehverhalten mit DTI und die erzielbaren Montagevorspannkkräfte gewonnen werden, die die Ergebnisse aus Kapitel 4.4 ergänzen. Zum anderen soll die Erhaltung der Vorspannkraft unter Betriebsbeanspruchung in Abhängigkeit von den erzielten Montagevorspannkkräften beurteilt werden. Um mögliche Vorspannkraftänderungen und -verluste auf einen vorhandenen direkten Kraftanzeiger zurückführen zu können, wurden nahezu identische Konfigurationen der vorgespannten Bauteile auch ohne DTI untersucht.

Für die Versuche wurde eine begrenzte Anzahl an Verbindungselementen, d.h. Prüfschrauben, Muttern und Scheiben sowie Bauteilen verwendet. Die Wiederverwendung dieser Komponenten stellt sicher, dass wesentliche Anteile des Setzens in allen Kontaktfugen und die daraus resultierenden Vorspannkraftverluste nach der erstmaligen Verwendung abgeklungen sind. Direkte Kraftanzeiger

können grundsätzlich nur einmal verwendet werden, so auch in den durchgeführten Versuchen.

Die Schraubengarnituren wurden im Rahmen der Bauteil-Zugversuche nicht bis zum Bruch belastet, da die durchgeführten Prüfungen nicht auf die Ausnutzung oder Feststellung der Tragfähigkeit der Schraubengarnituren zielten. Die Prüfschrauben wurden ausschließlich im elastischen Bereich beansprucht, so dass die Wiederverwendung unbedenklich war. Und auch teils große Schraubenkraftamplituden, die die Dauerfestigkeit überschritten, konnten aufgrund der geringen Anzahl keinen Ermüdungsbruch verursachen.

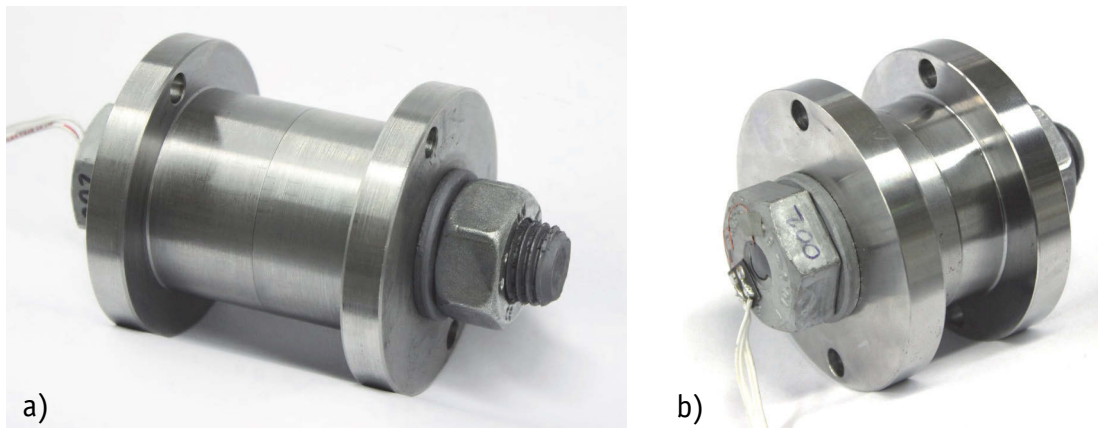
Die Schraubenkraft in den Prüfschrauben wurde bis zur Demontage aufgezeichnet, damit Fehler in der Messkette und besonders am eingebetteten Bolzen-DMS festgestellt werden konnten. Die angezeigte Schraubenkraft lag nach dem vollständigen Lösen der Verbindung innerhalb  $\pm 0,7$  kN und somit unterhalb von 1 % der betrachteten Mindestvorspannkkräfte.

#### 4.5.3.2 Vorzuspannende Bauteile

Die vorzuspannenden Bauteile sind Zylinder mit einem axialen Durchgangsloch und einem Flansch, siehe Bild 4.41. Der Außendurchmesser des Zylinders beträgt einheitlich 51 mm. Der Durchmesser  $d_0$  des Durchgangslochs wurde anhand der zu untersuchenden Schraubennennendurchmesser  $d$  und dem zugehörigen Nennlochspiel für normale runde Löcher nach EN 1090-2 festgelegt. Dieses beträgt für Schrauben M16 und M20 jeweils 2 mm und entspricht etwa dem Durchgangsloch der Reihe „mittel“ nach EN 20273.

Im Flansch wurden zwei axiale, gegenüberliegende Durchgangslöcher angeordnet. Diese wurden zur Fixierung der einzelnen Bauteile im Montagevorgang der Schraubengarnitur verwendet, siehe exemplarisch Bild 4.42 (a).

Die Vorspannkörper wurden aus Warmarbeitsstahl 56NiCrMoV7 (1.2714) durch Rund- und Plandrehen hergestellt. Die Härte und Festigkeit des Materials sowie die Oberflächengüte der Kontaktflächen überstieg die stahlbautypische Ausführung, so dass der Einfluss des Setzens der Oberflächen der Vorspannkörper und damit die entsprechenden Vorspannkraftverluste vernachlässigbar sind, insbesondere auch unter Berücksichtigung der Wiederverwendung der Vorspannkörper. Die Vorspannkörper waren nicht beschichtet.



**Bild 4.41.** Vorspannkörper aus zwei Bauteilen für den Bauteil-Zugversuch, vorgespannt mit einer HV-Garnitur, exemplarisch M20×110 (a) und M20×80 (b)

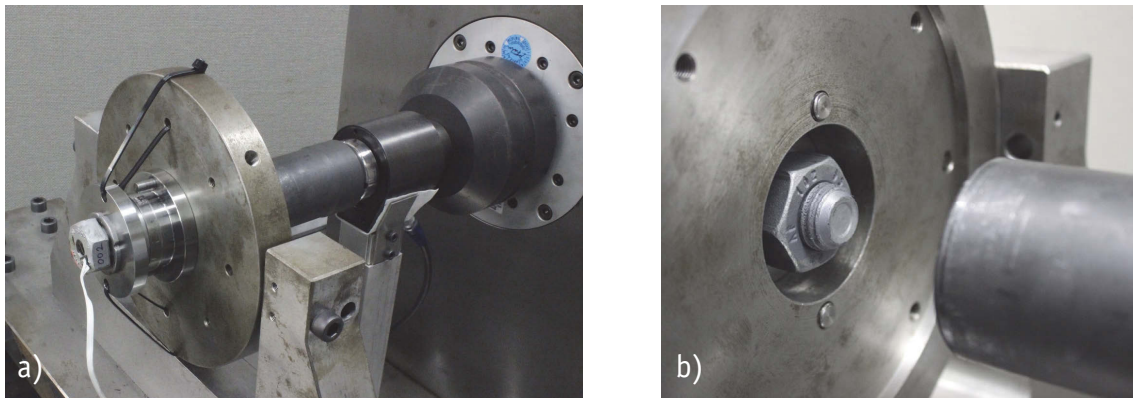
**Figure 4.41.** Clamped components for the component tensile test, preloaded with HV-system assembly, exemplary M20×110 (a) and M20×80 (b)

#### 4.5.3.3 Montage und Vorspannen der Bauteile

Die Prüfschrauben, Muttern und normalen Scheiben mit Fase wurden mehrfach wiederverwendet. Um ein gebrauchsfähiges Anziehverhalten der Garnitur sicherzustellen, wurden das Schraubengewinde, das Mutterngewinde und die Auflagefläche der Mutter mit GLEITMO 100S, Montagepastenspray auf Molybdändisulfid-Basis von der FUCHS LUBRITECH GMBH geschmiert. Aus anderweitigen Anziehprüfungen an feuerverzinkten HV-Garnituren ist bekannt, dass sich mit einer solchen Schmierung  $k$ -Faktoren im Bereich der  $k$ -Klasse K1 oder besser erzielen lassen. Für die Anwendung mit direkten Kraftanzeigern sind keine Anforderungen an den  $k$ -Faktor gestellt. Eine gute Schmierung, d.h. ein kleiner  $k$ -Faktor, wirkte sich hier positiv mit geringem Verschleiß bei mehrfacher Wiederverwendung aus.

Für die Prüfung der Eignung zur Feststellung der Schraubenkraft mittels DTI nach EN 14399-9 wird vorgeschrieben, dass die Garnitur horizontal zusammengebaut werden muss. Dieser Forderung wurde in den Anziehversuchen in Kapitel 4.4 entsprochen. Für die Montage der Vorspannkörper für den Bauteil-Zugversuch wurde die horizontale Anordnung ebenso gewählt. Damit konnte auch die Montage der Vorspannkörper als Prüfung der Eignung zur Feststellung der Schraubenkraft betrachtet werden und eine gemeinsame Datenbasis mit den Anziehversuchen gebildet werden.

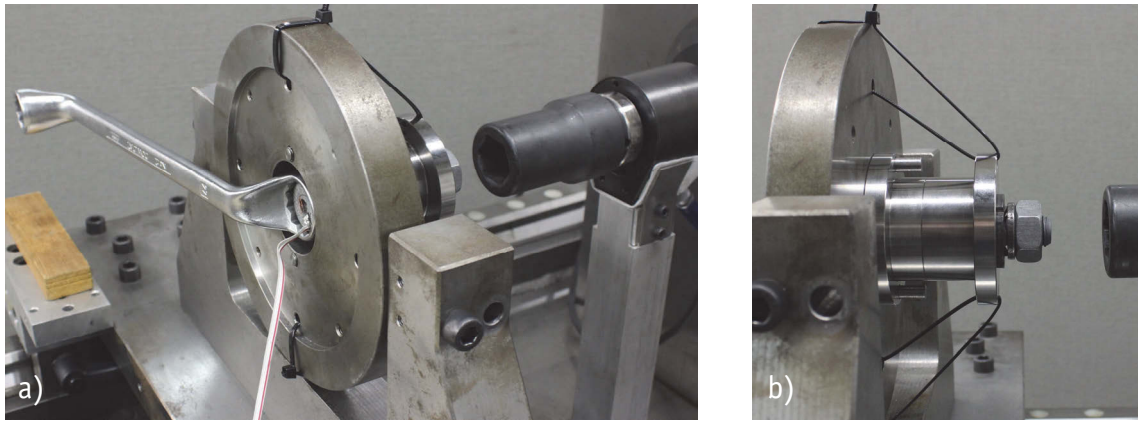
Die vormontierten Vorspannkörper wurden an einer Hilfskonstruktion des Anziehprüfstandes befestigt, siehe Bild 4.42. Damit war eine axial zentrierte Ausrichtung der Schraubenachse zur Rotationsachse des elektrischen Antriebs sichergestellt. Das Vorspannen sämtlicher Bauteile bzw. das Anziehen aller Schraubengarnituren erfolgte mit Hilfe des elektrischen Motors des Anziehprüfstandes. Hiermit war das Anziehen frei von Quer- bzw. Abstützkräften, die z. B. durch manuelles Anziehen mit einem Drehmomentschlüssel auftreten. Die Anziehggeschwindigkeit wurde konstant mit 2 U/min festgelegt. Grundsätzlich konnten der Drehwinkel und das Anziehdrehmoment als Überwachungs- oder Regelungsgröße eingesetzt werden. Die Schraubenkraft, gemessen mit dem Bolzen-DMS, war die wichtigste Überwachungsgröße, stand aber als automatische Regelungsgröße für den Anziehprüfstand nicht zur Verfügung.



**Bild 4.42.** Anziehen der Schraubengarnitur im Vorspannkörper in horizontaler Lage mit DTI unter dem Schraubenkopf

**Figure 4.42.** Tightening of the bolt assembly with DTI under the bolt head, clamping the components in horizontal position

Die beiden zu untersuchenden unterschiedlichen Konfigurationen des DTI innerhalb der Garnitur erforderten auch für das Vorspannen der Bauteile eine Anpassung der Fixierung. Bild 4.42 zeigt die vorgeschriebene Konfiguration für die Prüfung der Eignung zur Feststellung der Schraubenkraft nach EN 14399-9 mit dem DTI unter dem (fixierten) Schraubenkopf und der gedrehten Mutter. Die zweite untersuchte Konfiguration mit DTI unter der gedrehten Mutter ist in Bild 4.43 dargestellt.



**Bild 4.43.** Anziehen der Schraubengarnitur im Vorspannkörper in horizontaler Lage mit DTI unter der gedrehten Mutter

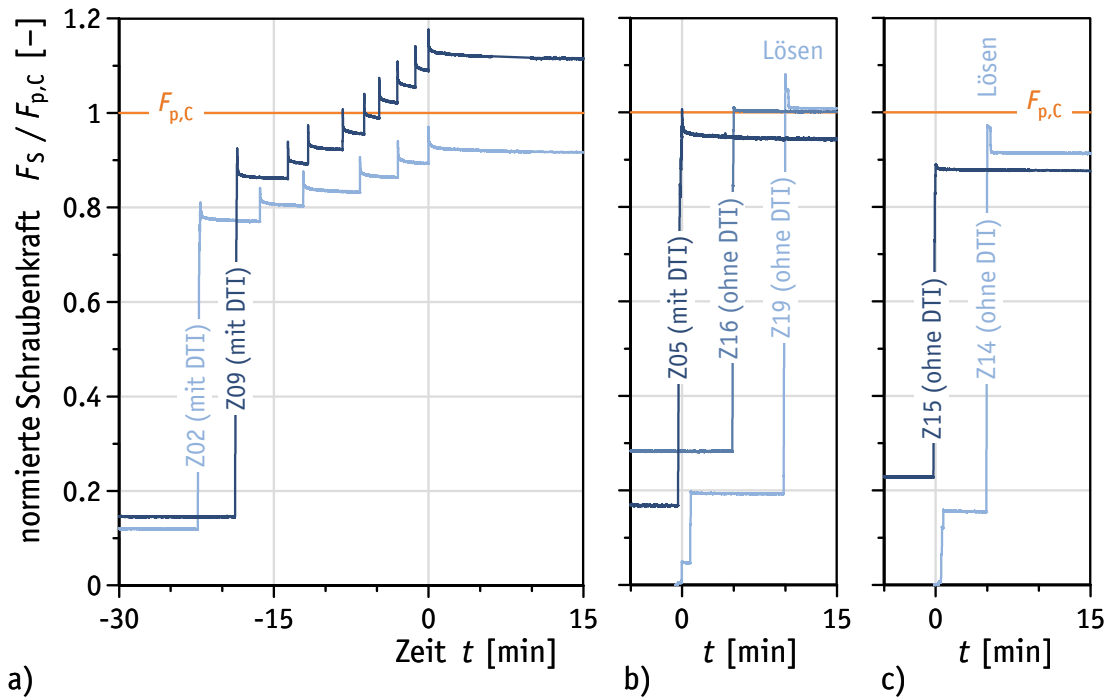
**Figure 4.43.** Tightening of the bolt assembly with DTI under the rotated nut, clamping the components in horizontal position

Für die durchgeführten Anziehvorgänge an unterschiedlichen Prüfkörpern lassen sich prinzipiell folgende Varianten und Zielsetzungen unterscheiden:

- für Garnituren mit DTI:  
schrittweises automatisch gesteuertes Anziehen bis zur Anzeige des anscheinenden Erreichens der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  durch die Fühllehre mit der vorgeschriebenen Dicke, hier Fühllehren-Kriterium genannt,
- für Garnituren mit oder ohne DTI:  
manuell gesteuertes Anziehen bis zum Erreichen der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$ , gemessen durch die Prüfschraube,
- Garnituren ohne DTI:  
manuell gesteuertes Anziehen bis zum Erreichen eines zu Vergleichszwecken festgelegten geringeren Vorspannkraftniveaus, gemessen durch die Prüfschraube.

Eine schematische Darstellung der prinzipiell verschiedenen Anziehvorgänge zeigt Bild 4.44. Es folgt eine Beschreibung der einzelnen Varianten.





**Bild 4.44.** Zeit-Schraubenkraft-Kurven des schrittweisen automatischen Anziehens bis zum Fühllehren-Kriterium (a) sowie des manuell gesteuerten Anziehens bis zur Mindestvorspannkraft (b) und bis zum festgelegten Vorspannkraftniveau (c)

**Figure 4.44.** Time-bolt load-curves for the stepwise automatic tightening up to the feeler gauge criterion (a), for the manually operated tightening up to the minimum preloading force (b) and up to the specified level of preloading force (c)

### Schrittweises Anziehen bis zur Anzeige von $F_{p,c}$ durch die Fühllehre

Das Anziehen erfolgte zunächst manuell gesteuert bis zu einem angestrebten Vorspannkraftniveau von etwa  $0,8 F_{p,c}$  für die Schraubengröße M16 und  $0,9 F_{p,c}$  für M20. Diese Niveaus wurden aus den vorgeschalteten Anziehversuchen entsprechend Kapitel 4.4 abgeleitet, um noch vor Erreichen des Fühllehren-Kriteriums die Höhe der Spalte zu registrieren. Es folgten weitere automatische Anziehschritte von jeweils zusätzlichen  $10^\circ$  Weiterdrehwinkel, bis die festgelegte Fühllehre in mehr als die Hälfte aller vorhandenen Spalte nicht mehr eindringen konnte. Die Mindestvorspannkraft sollte nun erreicht sein.

Dieses Vorgehen in verhältnismäßig kleinen Schritten diente dem möglichst präzisen Auffinden des Anzeigepunktes für das Fühllehren-Kriterium und somit dem Einstellen einer minimal erzielbaren Vorspannkraft, die allerdings die Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  übersteigen sollte. Die Mindestvorspannkraft wurde allerdings nicht in allen Prüfungen erreicht, siehe Bild 4.44 (a).



Nach jedem Anziehschritt wurden die Spalte mit unterschiedlich dicken Fühllehren ausgemessen. Daraus lässt sich der Zusammenhang zwischen der Schraubenkraft und der Höhe der Spalte unter Montagebedingungen ermitteln. Eine womöglich ungleichförmige Abplattung der DTI über ihren Umfang ist daraus zusätzlich ersichtlich.

Da die Abstufung der Dicke der verwendeten Fühllehren nicht für alle Versuche identisch war, wurden die angewendeten Sätze an Fühllehren in Paletten eingeteilt. Die Abstufung der Dicke der Fühllehren in den Paletten P0, P1 und P2 ist in Tabelle 4.6 zusammengestellt.

### **Manuell gesteuertes Anziehen bis $F_{p,c}$**

Das Anziehen erfolgte ausschließlich manuell gesteuert bis zur Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$ , wobei eine Überschreitung möglichst gering zu halten war. Für die Schraubengarnitur mit DTI war die Mindestvorspannkraft bei geringfügiger Überschreitung auch mit dem manuell gesteuerten Abschalten des Motors gut einstellbar. Dies lag an dem vergleichsweise langsamen Anwachsen der Schraubenkraft, da das Abplatten der Überstände verhältnismäßig große Verformungen und Drehwinkel erforderte. Nach Erreichen der Mindestvorspannkraft wurden die Spalte mit einer Palette unterschiedlich dicker Fühllehren ausgemessen, um das vorgeschriebene Fühllehren-Kriterium beurteilen zu können.

Die Schraubengarnitur ohne DTI erreichte aufgrund der vielfach größeren Steifigkeit des Klemmpakets bei deutlich kleinerem Drehwinkel die Mindestvorspannkraft. Dies führte bisweilen dazu, dass das angestrebte Vorspannkraftniveau überschritten wurde und ein geringfügiges Lösen nötig war, um die Mindestvorspannkraft einzustellen, siehe Bild 4.44 (b). Für die Schraubengarnitur ohne DTI war dies unproblematisch, da die wiederverwendeten Komponenten dieses höhere Vorspannkraftniveau bereits in vorhergehenden Prüfungen eingeprägt hatten und somit keine relevanten Setzbeträge vorweggenommen wurden.

Es wurden sowohl Prüfkörper mit DTI als auch solche ohne DTI untersucht, so dass der Einfluss der DTI in der vorgespannten Verbindung unter Betriebslast beurteilt werden konnte. Ebenso erlaubte das direkte Anziehen auf die Mindestvorspannkraft eine Beurteilung, wie sie durch die Prüfung der Eignung zur Feststellung der Schraubenkraft mittels DTI nach EN 14399-9 vorgeschrieben ist.

### **Manuell gesteuertes Anziehen bis zum festgelegten Vorspannkraftniveau**

Auch für das Anziehen auf ein geringeres Vorspannkraftniveau erfolgte die Steuerung manuell. Das festgelegte Vorspannkraftniveau resultierte aus den mit dem Fühllehren-Kriterium erzielten Vorspannkräften an Prüfkörpern mit DTI. So konnte bei nahezu identischer Montagevorspannkraft und nachfolgender Betriebsbeanspruchung direkt der Einfluss der DTI in der vorgespannten Verbindung beurteilt werden. Gegebenenfalls musste die einzustellende Vorspannkraft durch geringfügiges Lösen erreicht werden, falls diese zunächst überschritten war, siehe Bild 4.44 (c).

#### **4.5.3.4 Bauteil-Zugversuch**

Die Bauteil-Zugversuche wurden in einer servohydraulischen Zug-Druck-Prüfmaschine (Nennlast  $\pm 200$  kN) des Instituts für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen durchgeführt. Die installierte Aufnahmevorrichtung und ein eingebauter Vorspannkörper sind in Bild 4.45 dargestellt. Die Vorspannkörper wurden so eingebaut, dass die DTI sowohl in der Konfiguration unter dem Schraubenkopf als auch unter der Mutter in Belastungsrichtung oben lag, siehe Bild 4.45 (b). Damit war eine gute Zugänglichkeit für die Messung mit Fühllehren gegeben.

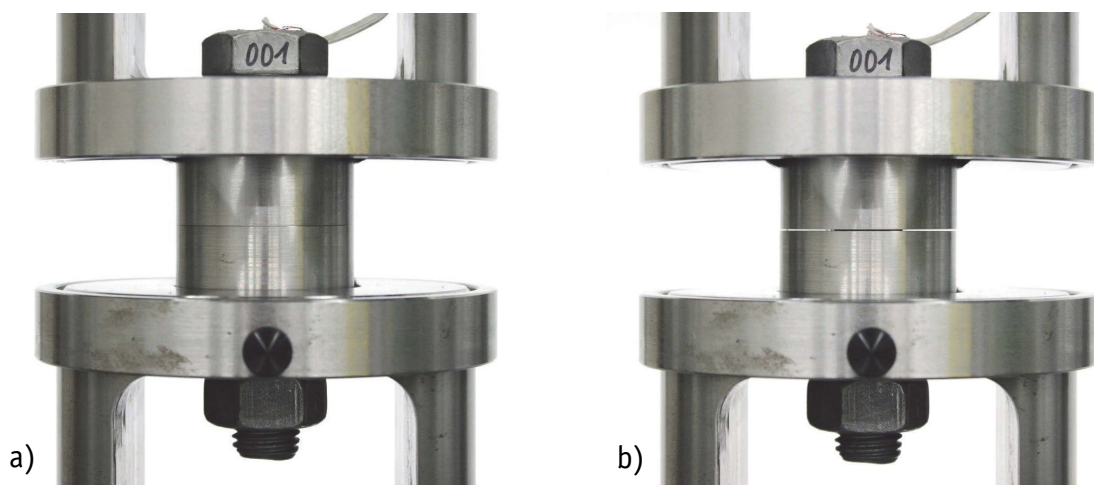
Die untere Aufnahmevorrichtung wurde nach dem Einbau des Vorspannkörpers um  $180^\circ$  in der Belastungsachse gedreht, so dass die Lagerung der Flansche des Vorspannkörpers antimetrisch erfolgte siehe Bild 4.45 (c). Damit konnte ein symmetrisches Klaffen der Trennfuge des Vorspannkörpers erreicht werden, siehe Bild 4.46.

Die Beanspruchung der Vorspannkörper erfolgte in Be- und Entlastungsstufen durch die in Schraubenachse gerichtete Axialkraft  $F_A$ . Den durchgeführten Versuchen können drei leicht variierende Typen von Lastkollektiven zugeordnet werden. Die Zeit-Axialkraft-Diagramme der Typen 1, 2 und 3 sind in Bild 4.47 schematisch dargestellt. Als größte Beanspruchung innerhalb des Lastkollektivs wurde der Bemessungswert der Zugtragfähigkeit  $F_{t,Rd}$  der Schraube als äußere Axialkraft  $F_A$  aufgebracht. Die in den einzelnen Bauteil-Zugversuchen ausgeführten Lastkollektive sind in Tabelle 4.13 zusammengestellt. Die Versuche Z03 und Z46 konnten nicht unmittelbar einem Typ von Lastkollektiv zugeordneten werden.



**Bild 4.45.** Vorgespannte Verbindung M20×110 mit DTI im Bauteil-Zugversuch

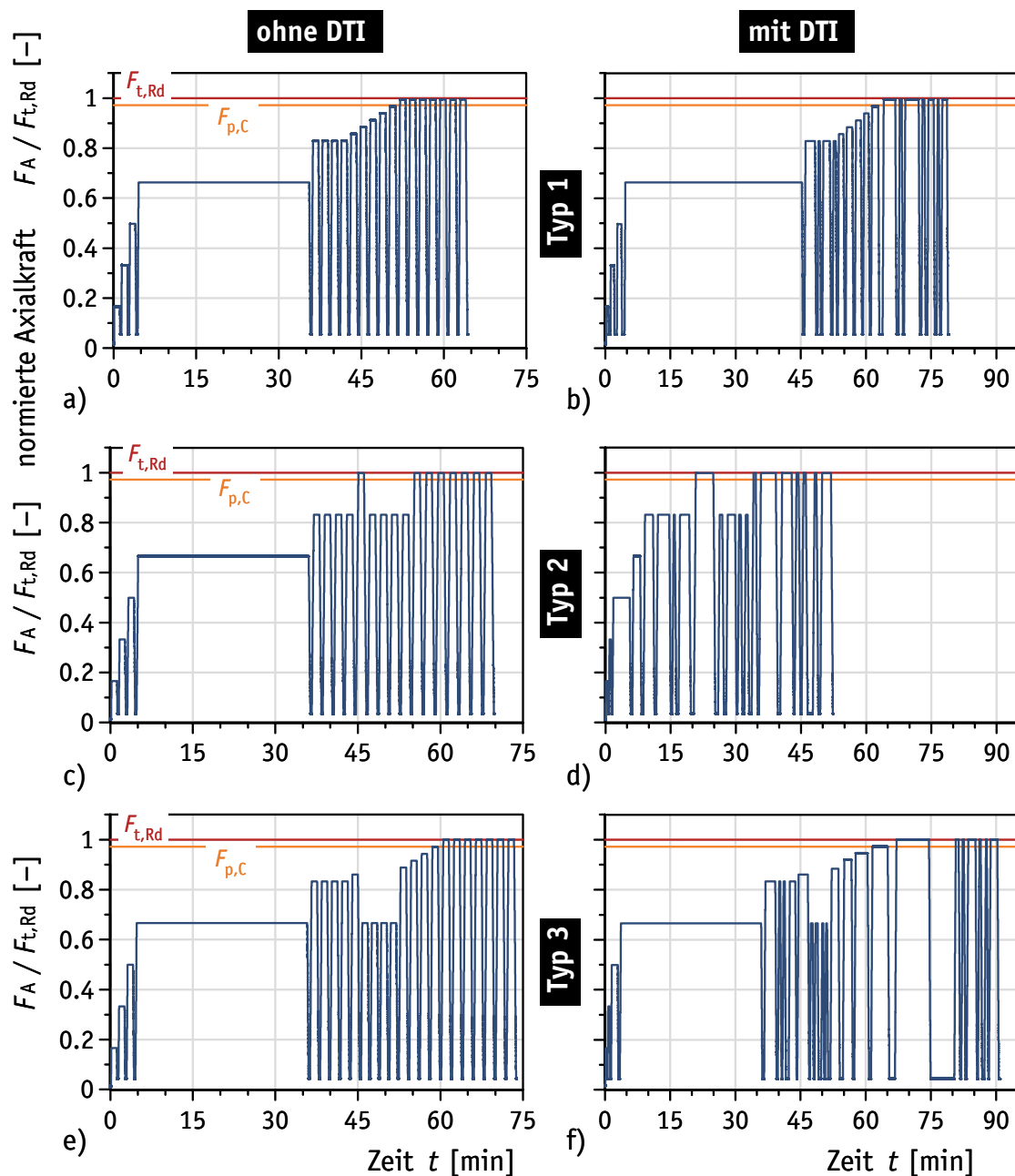
**Figure 4.45.** Preloaded connection M20×110 including DTI in the component tensile test



**Bild 4.46.** Vorgespannte Verbindung mit Garnitur M20×110 mit überdrückter (a) und mit klaffender (b) Trennfuge bei axialer Zugbeanspruchung

**Figure 4.46.** Preloaded connection with bolt assembly M20×110 with interface under pressure (a) and opening of the interface (b) in axial tensile loading

Die Versuche mit DTI in der Schraubengarnitur unterlagen keinen festen zeitlichen Vorgaben, da das Ausmessen aller Spalte mit mehreren Fühllehren unterschiedlich zeitintensiv war, siehe Bild 4.47 (b), (d) und (f). Versuche ohne DTI konnten nach einem automatisierten Prüfablauf durchgeführt werden und sind dementsprechend zeitlich gleichmäßig strukturiert, siehe Bild 4.47 (a), (c) und (e).



**Bild 4.47.** Zeit-Axialkraft-Diagramme der Lastkollektive der Typen 1, 2 und 3

**Figure 4.47.** Time-axial load-diagrams for the load spectrum types 1, 2 and 3

**Tabelle 4.13.** Lastkollektivform der einzelnen Bauteil-Zugversuche**Table 4.13.** Load spectrum type of individual component tensile tests

Kollektiv- form	Probennummer										
Typ 1	Z01	Z02	Z04	Z05	Z06	Z07	Z08	Z09	Z10	Z11	
	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16	Z18	Z19	Z28	Z29	Z30	
	Z31	Z36	Z37	Z39	Z40	Z41	Z44	Z45	Z47	Z48	
	Z49	Z50	Z51	Z52	Z53	Z54	Z57	Z58	Z60	Z62	
Typ 2	Z17	Z35	Z38	Z42	Z43	Z55	Z56	Z59	Z61		
Typ 3	Z20	Z21	Z22	Z23	Z24	Z25	Z26	Z27	Z32	Z33	Z34
nicht typ.	Z03	Z46									

#### 4.5.4 Versuchsergebnisse und Bewertung

##### 4.5.4.1 Darstellung der einzelnen Versuchsergebnisse

Der Bauteil-Zugversuch zeichnet sich durch den Anziehvorgang, eine Überwachungsphase des vorgespannten, unbelasteten Bauteils und den Zugversuch am Bauteil aus. Exemplarisch zeigt Bild 4.48 den Verlauf eines solchen Versuchs anhand der aufgezeichneten Messgrößen Schraubenkraft  $F_S$  und Axialkraft  $F_A$ .

Der Anziehvorgang entsprechend Bild 4.48 (a) und der Zugversuch entsprechend Bild 4.48 (b) sind mit einer einheitlichen Skalenteilung der Abszisse für die Zeit dargestellt. Als Nullpunkt der Abszisse ist der Beginn des Zugversuchs definiert. Die positive Achsrichtung zeigt die Dauer des Zugversuchs, die negative Achsrichtung den zurückliegenden Anziehvorgang. Die Auslassung im zeitlichen Verlauf zwischen dem Anziehvorgang (a) und dem Zugversuch (b) ist für die Versuche unterschiedlich groß. Es wurde eine Dauer der Überwachungsphase von mindestens zwölf Stunden eingeplant. In wenigen Versuchen ist diese Dauer unterschritten, in vielen dagegen deutlich überschritten worden.

Der Einfluss der Axialkraft auf die Schraubenkraft ist in Bild 4.48 (b) deutlich sichtbar. Mit anwachsender Axialkraft entstehen Schraubenzusatzkräfte, die die Schraubenkraft über das ursprüngliche Vorspannkraftniveau bei Beginn des Zugversuchs hinaus vergrößern. Bei Rücknahme der Axialkraft ist im Idealfall eine Verringerung der Schraubenkraft auf das zuvor vorhandene Vorspannkraftniveau zu verzeichnen. Im dargestellten Zugversuch der Schraubengarnitur mit DTI ist dieses ideale Verhalten ohne Verluste an Vorspannkraft nicht eingetreten. Mit jeder Belastungsstufe und der zugehörigen Schraubenzusatzkraft war nach deren

Rücknahme eine Verringerung der Schraubenkraft, d.h. der verbleibenden Vorspannkraft zu beobachten.

Die chronologische Erfassung von Axialkraft und Schraubenkraft ist für jede Laststufe in Tabelle 4.15 zusammengestellt. Eine Belastung aus der Axialkraft ist mit der darauffolgenden Entlastung zu einem Lastwechsel zeilenweise zusammengefasst. Damit ergibt sich unmittelbar der Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung für das beanspruchungsabhängige Verhalten der Schrauben- bzw. Vorspannkraft. Mit anwachsenden äußeren Axialkräften wird der Zustand einer klaffenden Trennfuge im Bauteil im Lastwechsel Nr. 12 (Laststufe Nr. 24) erstmalig erreicht. Axialkraft und Schraubenkraft sind nun identisch. Entsprechende Zustände unter Belastung sind mit dem Symbol „=“ in Spalte 7 gekennzeichnet.

Das korrelierte Verhalten von Axialkraft und Schraubenkraft ist in Bild 4.48 (c) deutlich ersichtlich. Die grafische Darstellung erfolgt mit Hilfe der Normierung von Schraubenkraft (Ordinate) und Axialkraft (Abszisse). Die Normierung der Schraubenkraft auf die Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  ermöglicht neben der Einordnung des Vorspannkraftniveaus bei Beginn des Zugversuchs auch das Verfolgen der Entwicklung der Vorspannkraft nach diversen Belastungszyklen. Die Axialkraft wurde in Bild 4.48 (c) auf den Bemessungswert der Zugtragfähigkeit  $F_{t,Rd}$  normiert. Dieser ist der größte Wert der Axialkraft, dessen Wirkung im Zugversuch untersucht werden sollte.

Der Vorspannkraftverlust durch die Belastungsgeschichte ist als relative Größe sichtbar. Hier begann der Zugversuch mit einer Vorspannkraft von 96 % der Mindestvorspannkraft. Nach siebenmaligem Erreichen des Bemessungswertes der Zugtragfähigkeit waren noch 86 % der Mindestvorspannkraft vorhanden, vgl. ebenso Tabelle 4.15, Spalte 16, Laststufen Nr. 1 und 37. Bezogen auf den Ausgangszustand entspricht dies einem Vorspannkraftverlust von 10 %.

Neben diesem einzelnen exemplarischen Ergebnis erfolgt die ausführliche Beschreibung und Bewertung der Vorspannkraftverluste durch Schraubenzusatzkräfte in Kapitel 4.5.4.5. Die Ergebnisse jedes einzelnen Bauteil-Zugversuchs sind in Anhang C.3 analog zu Bild 4.48 und Tabelle 4.15 detailliert dargestellt.

Der Anziehvorgang ist darüber hinaus tabellarisch erfasst worden, siehe exemplarisch Tabelle 4.14, analog zu den Tabellen 4.7 und 4.8. Das Anziehen einer Schraubengarnitur mit DTI erfolgte in Anziehschritten, in denen mit einer Palette von Fühllehren – hier mit Palette P2 – die vorhandenen Spalte ausgemessen wurden. Im dargestellten Beispiel handelt es sich um eine Garnitur mit DTI der Grö-

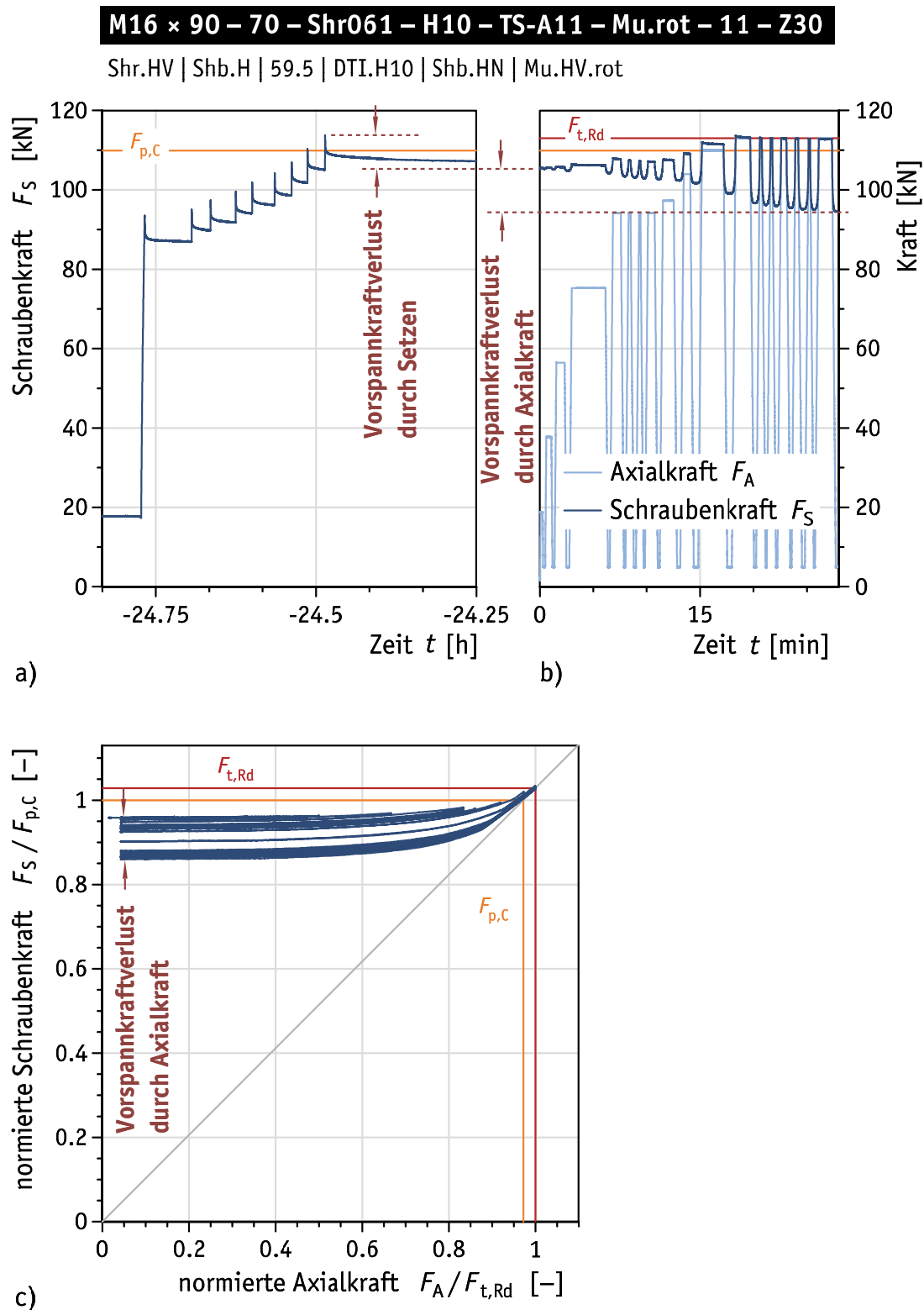
ße M16 mit vier Überständen bzw. Spalten. Für jeden Spalt wurde – wie bereits für die Anziehversuche in Kapitel 4.4.3.2 erläutert – bei jedem Anziehschritt die Mindesthöhe des Spaltes  $h_{\text{gap,inf}}$  protokolliert. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass eine Fühllehre mit eben dieser protokollierten Dicke in den Spalt eindringen konnte, die nächst dickere Fühllehre der genutzten Palette jedoch nicht. Die Unsicherheit bezüglich der wirklichen Höhe des Spaltes besteht im Unterschied der Dicken zwischen der nicht eindringenden und der eindringenden Fühllehre.

Für Erläuterungen zur Definition und Bestimmung der gemittelten Höhe  $h_{\text{gap,m}}$  aller Spalte in einem Anziehschritt, der Streuung  $R/2$  als Maß für das gleichmäßige Abplatten sowie der Anzahl  $n_{\text{refusal}}$  der festgestellten Sperrweiten je Anziehschritt wird auf Kapitel 4.4.3.2 verwiesen.

Hier ist der Versuch Z30 dargestellt, in dem der DTI auf der Bauteilseite mit der gedrehten Mutter unter der mutterseitigen Scheibe angeordnet war. Daher war die festgelegte Fühllehre zur Feststellung der Anzahl der Sperrweiten 0,25 mm dick, wie in Tabelle 4.14 ausgewiesen.

In diesem Beispiel konnte der Spalt 1 vom ersten Anziehschritt an als Sperrweite mit ausreichend geringer Höhe gezählt werden. Spalt 2 erfüllte dieses Kriterium mit dem Erreichen einer Vorspannkraft  $F_5$  von 100 kN im vierten Anziehschritt. Für die Feststellung des Erreichens der Mindestvorspannkraft mit dem Fühllehren-Kriterium war nun das Auftreten einer weiteren, dritten Sperrweite erforderlich, damit die Anzahl der Sperrweiten die halbe Anzahl der Überstände bzw. Spalte übertraf. Mit einer Vorspannkraft von 114 kN wurde im neunten Anziehschritt die dritte Sperrweite an Spalt 4 registriert. Der Anziehvorgang wurde nun beim Erreichen des Fühllehren-Kriteriums beendet. Die erzielte Vorspannkraft lag oberhalb der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$ . Mit dem unmittelbar eintretenden Setzen verringerte sich die Vorspannkraft jedoch, so dass die Mindestvorspannkraft wieder unterschritten wurde, siehe Bild 4.48 (a).

Die einzelnen Anziehschritte zur Montage der Vorspannkörper sind in Anhang C.3 für jeden einzelnen Versuch analog zu Tabelle 4.14 zusammengestellt.
















**Bild 4.48.** Ergebnisse eines Bauteil-Zugversuchs (Nr. Z30): Zeit-Schraubenkraft-Diagramm der Montage (a), Zeit-Kraft-Diagramm bei Zugbeanspruchung (b) und normiertes Axialkraft-Schraubenkraft-Diagramm (c)

**Figure 4.48.** Results of a component tensile test (No. Z30): time-bolt load-diagram during assembly (a), time-load-diagram during tensile loading (b) and normalized axial load-bolt load-diagram (c)



**Tabelle 4.14.** Ergebnisse des Anziehvorgangs mit DTI, exemplarisch für den Bauteil-Zugversuch Nr. Z30

**Table 4.14.** Results of the tightening process including a DTI, exemplarily illustrated the component tensile test No. Z30

M16 – H10 – TS-A11 – Mu.rot – 11 – Z30											
$F_S$	[kN]		94	95	97	100	102	104	107	110	114
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,6	0,61	0,62	0,63	0,65	0,66	0,68	0,7	0,72
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,85	0,87	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97	1,0	1,03
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,22	0,2	0,15	0,1	0,05	0	0	0	0
		2	0,35	0,32	0,25	0,22	0,15	0,125	0,08	0,05	0
		3	0,6	0,6	0,55	0,5	0,5	0,45	0,4	0,35	0,32
		4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,35	0,32	0,28	0,25	0,22
Fühllehre	[mm]	0,25									
$n_{refusal}$	[-]		1	1	1	2	2	2	2	2	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,44	0,42	0,36	0,32	0,28	0,24	0,2	0,17	0,15
$R / 2$	[mm]		±0,22	±0,23	±0,23	±0,23	±0,25	±0,25	±0,23	±0,2	±0,18

**Tabelle 4.15.** Ergebnisse des Zugversuchs mit DTI, exemplarisch für den Bauteil-Zugversuch Nr. Z30

**Table 4.15.** Results of the tensile test including a DTI, exemplarily illustrated for the component tensile test No. Z30

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
[min]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	=	[-]	[-]	[-]	[min]		[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 90 – 70 – Shr061 – H10 – TS-A11 – Mu.rot – 11 – Z30															
M	M		113,7				0,00	1,01	1,03	M			113,7	1,01	1,03
0	0		0,0	105,4			0,00	0,93	0,96	1	-0,2	0,0	105,4	0,93	0,96
1	2	0,1	18,9	105,5	5,59		0,17	0,93	0,96	3	0,4	4,9	105,3	0,93	0,96
2	4	0,6	37,7	105,6	2,80		0,33	0,93	0,96	5	1,3	4,9	105,2	0,93	0,96
3	6	1,5	56,5	105,8	1,87		0,50	0,94	0,96	7	2,6	4,9	104,8	0,93	0,95
4	8	3,0	75,3	106,5	1,41		0,67	0,94	0,97	9	6,5	4,9	104,2	0,92	0,95
5	10	6,9	94,2	108,0	1,15		0,83	0,96	0,98	11	7,9	4,9	103,4	0,91	0,94
6	12	8,3	94,2	107,4	1,14		0,83	0,95	0,98	13	8,9	4,9	103,1	0,91	0,94
7	14	9,3	94,2	107,3	1,14		0,83	0,95	0,98	15	9,8	4,9	102,9	0,91	0,94
8	16	10,1	94,2	107,2	1,14		0,83	0,95	0,98	17	11,1	4,9	102,7	0,91	0,93
9	18	11,5	97,3	107,6	1,11		0,86	0,95	0,98	19	13,0	4,9	102,4	0,91	0,93
10	20	13,5	104,0	109,3	1,05		0,92	0,97	0,99	21	14,6	4,9	101,7	0,90	0,93
11	22	15,2	110,0	112,1	1,02		0,97	0,99	1,02	23	17,8	4,9	99,1	0,88	0,90
12	24	18,3	113,0	113,6	1,01	=	1,00	1,00	1,03	25	20,1	4,9	96,7	0,86	0,88
13	26	20,6	113,0	113,1	1,00	=	1,00	1,00	1,03	27	21,2	4,9	96,2	0,85	0,88
14	28	21,6	113,0	113,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	29	22,2	4,9	96,0	0,85	0,87
15	30	22,6	113,0	112,9	1,00	=	1,00	1,00	1,03	31	23,5	4,9	95,4	0,84	0,87
16	32	23,9	113,0	112,9	1,00	=	1,00	1,00	1,03	33	24,7	4,9	95,2	0,84	0,87
17	34	25,2	113,0	112,8	1,00	=	1,00	1,00	1,03	35	25,7	4,9	95,1	0,84	0,86
18	36	26,1	113,0	112,8	1,00	=	1,00	1,00	1,03	37	27,8	4,9	94,5	0,84	0,86

#### 4.5.4.2 Montagevorspannkraft mit Fühllehren-Kriterium

Die Montagevorspannkraft muss beim Erreichen des Fühllehren-Kriteriums für die entsprechende Montagekonfiguration des DTI die Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  übertreffen. Für direkte Kraftanzeiger entsprechend EN 14399-9 muss die *Prüfung der Eignung zur Feststellung der Schraubenkraft* erfolgreich durchgeführt werden, vgl. Kapitel 4.4. Im Gegensatz zu den Anziehversuchen in Kapitel 4.4 ist die Versuchsdurchführung bei der Montage der Vorspannkörper nicht in allen Anforderungen konform zu EN 14399-9 bzw. zu der dort referenzierten EN 14399-2. In Tabelle 4.16 sind die Abweichungen bzw. besonderen Bedingungen zusammengestellt. Die Montage der Vorspannkörper soll aber dennoch in Ergänzung der Anziehversuche hinsichtlich der Anzeige des Erreichens der Mindestvorspannkraft durch das Fühllehren-Kriterium genutzt werden.

**Tabelle 4.16.** Abweichungen zu den Anforderungen an die Prüfung nach EN 14399-9 und -2

**Table 4.16.** Variations to the requirements of the testing according to EN 14399-9 and -2

Anforderung nach EN 14399-9 und -2	Abweichung / besondere Bedingung
kalibrierte Kraftmessdose	kalibrierte Prüfschraube mit Bolzen-DMS
einmalige Verwendung jedes Elementes der Prüfgarnitur	Wiederverwendung von Prüfschraube, Mutter und Scheiben
Scheibe unter der Mutter darf sich während des Anziehens nicht drehen	keine Beeinflussung oder Verhinderung der Verdrehung der Scheibe unter der Mutter
Prüfgarnituren im Anlieferungszustand ohne Änderung des Schmierungs Zustands	Reinigung und neue Schmierung bei Wiederverwendung von Prüfschraube und Mutter
kontinuierliches Drehen der Mutter	unterbrochenes Anziehen durch Drehen der Mutter
DTI unter dem fixierten Schraubenkopf, Anziehen durch Drehen der Mutter, Anwendung der 0,4 mm Fühllehre	Ausführung ebenso und zusätzlich: DTI unter der rotierten Mutter, Anwendung der 0,25 mm Fühllehre

Die vergleichende Verwendung von kalibrierten Prüfschrauben zusammen mit einer Kraftmessdose wird in Kapitel 4.6 erörtert. Es ist davon auszugehen, dass die Messunsicherheit und der Wiederholbarkeitsfehler für die Prüfschrauben ungünstiger, aber in diesem Rahmen hinreichend sind.

Für die alleinige Bewertung des DTI ist die Verwendung von neuen Komponenten nicht unbedingt erforderlich. Durch das vollständig neue Zusammenset-

zen und Ausrichten der Garnitur in jeder neuen Prüfung sind die Verbindungen derartig verschieden, dass die Einflüsse unterschiedlicher Komponenten vernachlässigbar erscheinen. Das unterschiedliche Verformungsverhalten der Überstände in verschiedenen Prüfungen bestätigt dies. Die Anforderung ist hingegen für die *Prüfung der Eignung zum Vorspannen mit direktem Kraftanzeiger in einer Garnitur* unbedingt einzuhalten, da die Schraubengarnitur große plastische Verformungen erfährt. Diese wird hier allerdings nicht durchgeführt.

Gleiches gilt für das Mitdrehen der mutterseitigen Scheibe sowie für die Schmierung im Anlieferungszustand. Das erneute Schmieren der wiederzuverwendenden Komponenten ist für den DTI unerheblich, da die Montage ausschließlich im Bereich elastischer Verformungen der Schraubengarnitur erfolgt. Der DTI erfährt bestimmungsgemäß plastische Verformungen, die aber unabhängig von der Schmierung sind. Das Mitdrehen der Scheibe unter der Mutter ist unter Umständen von Bedeutung, falls es sich um die mutterseitige Scheibe zwischen DTI und Mutter handelt. Der mögliche Einfluss dieser Montagekonfiguration wird allerdings durch ein strengeres Fühllehren-Kriterium aufgefangen.

Ein kontinuierliches Drehen und gleichzeitiges Anwenden des Fühllehren-Kriteriums ist nicht möglich. Das Ausmessen der Spalte alleine mit einer Fühllehre erfordert das Unterbrechen des Anziehvorgangs. Um möglichst genau die erstmalige positive Anzeige des Fühllehren-Kriteriums aufzufinden, waren mehrere Anziehschritte unbedingt erforderlich.

Die Bewertung der mit dem Fühllehren-Kriterium erzielten Vorspannkraft wird entsprechend Tabelle 4.10 durchgeführt. Die Erläuterung unterschiedlicher Konstellationen erfolgt nachfolgend exemplarisch anhand von erzielten Ergebnissen.

In Tabelle 4.17 sind die erzielten Montagevorspannkraft der Vorspannkörper M16 zusammengestellt, in Tabelle 4.18 diejenigen der Vorspannkörper M20. Es handelt sich hierbei um die zusammenfassende Darstellung der einzelnen Versuche, die in Anhang C.3 analog zu Tabelle 4.14 ausführlich dokumentiert sind. Exemplarisch wird die Überführung des Zugversuchs Z30 aus Tabelle 4.14 in Tabelle 4.17 erläutert.

Für den Zugversuch Z30 wurden insgesamt neun Anziehschritte ausgeführt. In der Unterbrechung nach jedem Anziehschritt wurden die Spalte mit Fühllehren ausgemessen und die Anzahl der Sperrweiten  $n_{\text{refusal}}$  bestimmt. Um die Anzahl der Sperrweiten zu bestimmen, wäre es grundsätzlich ausreichend gewesen, die Fühllehre mit der für die gegebene Montagekonfiguration festgelegten Dicke

zu verwenden. Für die vorliegende Konfiguration des DTI auf der Seite der gedrehten Mutter (*Mu.rot*) wäre dies die Fühllehre mit einer Dicke von 0,25 mm. Die aufwendigere Bestimmung der einzelnen Höhen der Spalte mit der Palette P2 von Fühllehren diene der Bestimmung des Verformungsverhaltens.

Im neunten Anziehschritt wurde das Fühllehren-Kriterium erstmalig erreicht, siehe letzte Spalte in Tabelle 4.14. Die protokollierten Daten dieser Spalte sind in die entsprechende Zeile der Tabelle 4.17 übertragen worden, vgl. hierzu die Spalte

**Tabelle 4.17.** Montagevorspannkräfte der Vorspannkörper M16 bei Erreichen des Fühllehren-Kriteriums

**Table 4.17.** Assembly preloads for components M16 upon reaching the feeler gauge criterion

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Prüfung Nr.	DTI Nr.	Montage-konfiguration	erf. Fühllehre [mm]	Montagekriterium	Anziehschritt zu $F_s$	$F_s$ [kN]	$F_s / F_{ub}$ [-]	$F_s / F_{p,c}$ [-]	$F_s - F_{p,c}$ [-]	$n_{refusal}$ [-]	$n_{gap}$ [-]	$n_{refusal} / n_{gap}$	$h_{gap,m}$ [mm]	$R / 2$ [mm]	$h_{gap,m}$	$h_{gap,inf}$	Bewertung
<b>M16 – H8 – AND-A1</b>																	
Z01	10	Shr.fix	0,4	0,4	5	81,6	0,65	0,93		3	4		0,34	±0,1			n.i.O.
Z02	11	Shr.fix	0,4	0,4	6	85,3	0,68	0,97		3	4		0,35	±0,12			n.i.O.
Z03	12	Shr.fix	0,4	0,4	8	85,8	0,68	0,98		3	4		0,29	±0,18			n.i.O.
Z04	13	Shr.fix	0,4	0,4	6	83,0	0,66	0,94		3	4		0,3	±0,21			n.i.O.
Z05	14	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	88,5	0,7	1,01		4	4		0,29	±0,09			n.i.O.
Z06	15	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	88,2	0,7	1,0		4	4		0,3	±0,1			n.i.O.
Z07	16	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	90,6	0,72	1,03		4	4		0,19	±0,09			k.A.
Z08	22	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	88,3	0,7	1,0		4	4		0,24	±0,1			n.i.O.
Z09	23	Mu.rot	0,25	0,25	9	103,5	0,82	1,18		3	4		0,14	±0,14			i.O.
Z10	24	Mu.rot	0,25	0,25	4	95,4	0,76	1,08		3	4		0,18	±0,2			i.O.
Z11	25	Mu.rot	0,25	0,25	1	92,0	0,73	1,05		3	4		0,22	±0,23			i.O.
Z12	26	Mu.rot	0,25	0,25	10	99,5	0,79	1,13		4	4		0,12	±0,13			i.O.
<b>M16 – H10 – TS-A10</b>																	
Z20	1	Shr.fix	0,4	0,4	1	86,0	0,55	0,78		3	4		0,3	±0,13			n.i.O.
Z21	2	Shr.fix	0,4	0,4	5	82,5	0,53	0,75		3	4		0,37	±0,07			n.i.O.
Z22	3	Shr.fix	0,4	0,4	5	82,0	0,52	0,75		3	4		0,36	±0,08			n.i.O.
Z63	4	Shr.fix	0,4	0,4	5	83,5	0,53	0,76		3	4		0,37	±0,14			n.i.O.
Z23	5	Shr.fix	0,4	0,4	5	79,0	0,5	0,72		3	4		0,33	±0,14			n.i.O.
Z24	6	Shr.fix	0,4	0,4	5	81,3	0,52	0,74		4	4		0,35	±0,08			n.i.O.
<b>M16 – H10 – TS-A11</b>																	
Z25	6	Shr.fix	0,4	0,4	5	93,9	0,6	0,85		3	4		0,37	±0,07			n.i.O.
Z26	7	Shr.fix	0,4	0,4	8	103,9	0,66	0,95		3	4		0,28	±0,15			n.i.O.
Z27	8	Shr.fix	0,4	0,4	11	101,6	0,65	0,92		4	4		0,29	±0,11			n.i.O.
Z28	9	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	110,3	0,7	1,0		4	4		0,13	±0,14			n.i.O.
Z29	10	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	110,3	0,7	1,0		4	4		0,1	±0,11			n.i.O.
Z30	11	Mu.rot	0,25	0,25	9	113,7	0,72	1,03		3	4		0,15	±0,18			i.O.
Z31	12	Mu.rot	0,25	0,25	3	105,0	0,67	0,96		3	4		0,18	±0,2			n.i.O.

ten 7 bis 9, 11, 14 und 15 der Tabelle 4.17. Die grafische Darstellung der Höhe der Spalte  $h_{\text{gap,inf}}$  ist in den Tabellen 4.17 und 4.18 für eine verbesserte Vergleichbarkeit modifiziert worden, siehe Spalte 17 ebenda. Die Linien beginnen links mit dem größten Wert  $h_{\text{gap,inf,i}}$ . Im Sinne der Abwicklung der kreisförmig angeordneten Spalte endet die Linie rechts mit der Wiederholung des ersten Wertes, so dass die Linie gedanklich einfach zu einem Kreis geschlossen werden kann. Die Länge der Linie ist von der Anzahl der Spalte  $n_{\text{gap}}$  abhängig, vgl. Spalte 12 ebenda.

Zusätzliche grafische Elemente in den Spalten 10, 13 und 16 verdeutlichen die Unterschiede der einzelnen Versuche. Spalte 10 zeigt qualitativ die Unter- (roter Balken nach links) oder Überschreitung (grüner Balken nach rechts) der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  (Mittellinie). Die Skalierung ist an dem Minimum bzw. Maximum übergreifend über die Tabellen 4.17 und 4.18 orientiert. Die relative Anzahl von Sperrweiten ist in Spalte 13 visualisiert. Das Überschreiten der Mittellinie nach rechts bedeutet das Erreichen des Fühllehren-Kriteriums mit der erforderlichen Fühllehre entsprechend Spalte 4. Die gemittelte Höhe  $h_{\text{gap,m}}$  über alle

**Tabelle 4.18.** Montagevorspannkraft der Vorspannkörper M20 bei Erreichen des Fühllehen-Kriteriums

**Table 4.18.** Assembly preloads for components M20 upon reaching the feeler gauge criterion

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Prüfung Nr.	DTI Nr.	Montage-konfiguration	erf. Fühllehre [mm]	Montagekriterium	Anziehschritt zu $F_s$	$F_s$ [kN]	$F_s / F_{ub}$ [-]	$F_s / F_{p,c}$ [-]	$F_s - F_{p,c}$ [-]	$n_{\text{refusal}}$ [-]	$n_{\text{gap}}$ [-]	$n_{\text{refusal}} / n_{\text{gap}}$	$h_{\text{gap,m}}$ [mm]	$R / 2$ [mm]	$h_{\text{gap,m}}$	$h_{\text{gap,inf}}$	Bewertung
<b>M20 – H8 – AND-A2</b>																	
Z40	9	Shr.fix	0,4	0,4	3	138,8	0,71	1,01		5	5		0,35 ±0,05				n.i.O.
Z64	10	Shr.fix	0,4	0,4	4	139,3	0,71	1,01		3	5		0,38 ±0,1				n.i.O.
Z41	11	Shr.fix	0,4	0,4	1	127,4	0,65	0,93		3	5		0,39 ±0,13				n.i.O.
Z42	12	Shr.fix	0,4	0,4	1	130,3	0,66	0,95		4	5		0,35 ±0,1				n.i.O.
Z43	13	Shr.fix	0,4	0,4	2	135,2	0,69	0,99		5	5		0,36 ±0,04				n.i.O.
Z44	17	Shr.fix	0,4	0,4	5	137,3	0,7	1,0		3	5		0,4 ±0,05				n.i.O.
Z45	14	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	141,0	0,72	1,03		5	5		0,31 ±0,05				k.A.
Z46	15	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	141,4	0,72	1,03		5	5		0,2 ±0,05				k.A.
Z47	16	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	138,5	0,71	1,01		5	5		0,22 ±0,04				n.i.O.
Z48	18	Mu.rot	0,25	0,25	5	134,6	0,69	0,98		3	5		0,22 ±0,16				n.i.O.
Z49	24	Mu.rot	0,25	0,25	3	133,6	0,68	0,97		3	5		0,2 ±0,2				n.i.O.
Z50	25	Mu.rot	0,25	0,25	3	132,0	0,67	0,96		3	5		0,26 ±0,17				n.i.O.
Z51	26	Mu.rot	0,25	0,25	3	139,9	0,71	1,02		4	5		0,14 ±0,14				i.O.
Z52	27	Mu.rot	0,25	0,25	4	140,1	0,72	1,02		3	5		0,22 ±0,2				i.O.
Z53	28	Mu.rot	0,25	0,25	3	133,3	0,68	0,97		3	5		0,2 ±0,23				n.i.O.

Spalte zeigt der grafische Balken in Spalte 16. Ein vollständiger Balken größter Länge zeigt den größten mittleren Spalt. Eine Verkleinerung des mittleren Spaltes resultiert in einem verkürzten Balken.

Beim erstmaligen Erreichen des Fühllehren-Kriteriums im neunten Anziehschritt wurde eine Schraubenkraft  $F_S$  von  $1,03 F_{p,c}$  festgestellt. Damit hat das Fühllehren-Kriterium das Erreichen der Mindestvorspannkraft angezeigt. Dieser Versuch wird entsprechend Tabelle 4.10 mit „i.O.“ (in Ordnung) bewertet. Bei nominell identischen Randbedingungen zeigte der Versuch Z31 ein anderes Ergebnis. Bei Erreichen des Fühllehren-Kriteriums im dritten Anziehschritt wurde lediglich eine Montagevorspannkraft von  $0,96 F_{p,c}$  erreicht. Der Versuch wird mit „n.i.O.“ (nicht in Ordnung) bewertet, da die Mindestvorspannkraft nach Beendigung des Anziehens nicht erreicht wurde. Der Einsatz der maßgebenden Fühllehre weist allerdings das Gegenteil aus.

Einen Sonderfall stellt das direkte Einstellen der Mindestvorspannkraft durch einen einzigen Anziehschritt dar. Entsprechend Tabelle 4.17 sind dies die Versuche Z05 bis Z08, Z28 und Z29 sowie entsprechend Tabelle 4.18 die Versuche Z45 bis Z47. Ist die Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  bis zu einer Überschreitung von 1 % eingestellt worden, so muss bei einer dabei vorliegenden hohen Anzahl von Sperrweiten davon ausgegangen werden, dass das Fühllehren-Kriterium auch schon vor dem Erreichen der Mindestvorspannkraft einen ausreichenden Anzug signalisiert. Daher sind die Versuche Z05, Z06, Z08, Z28, Z29 und Z47 mit „n.i.O.“ zu bewerten. In allen Versuchen wurde mit dem Erreichen der Mindestvorspannkraft die größtmögliche Anzahl von Sperrweiten registriert.

Wurde die Schraubenkraft durch einen einzelnen Anziehschritt nicht hinreichend genau auf  $F_{p,c}$  (+1 %), sondern höher eingestellt, konnte auch die zugehörige hohe Anzahl der Sperrweiten nicht zweifelsfrei bewertet werden, siehe Versuche Z07, Z45 und Z46 ebenda. Eine geringere Vorspannkraft lässt theoretisch auch eine geringere Anzahl von Sperrweiten zu, so dass eine positive Bewertung möglich wäre. Der bei diesen Versuchen deutlich geringere gemittelte Spalt lässt allerdings auch hier ein negatives Ergebnis befürchten. Neutral formuliert lautet die Bewertung „k.A.“ (keine Angabe) für diese Versuche.

#### 4.5.4.3 Last-Verformung-Verhalten des DTI im Anziehvorgang

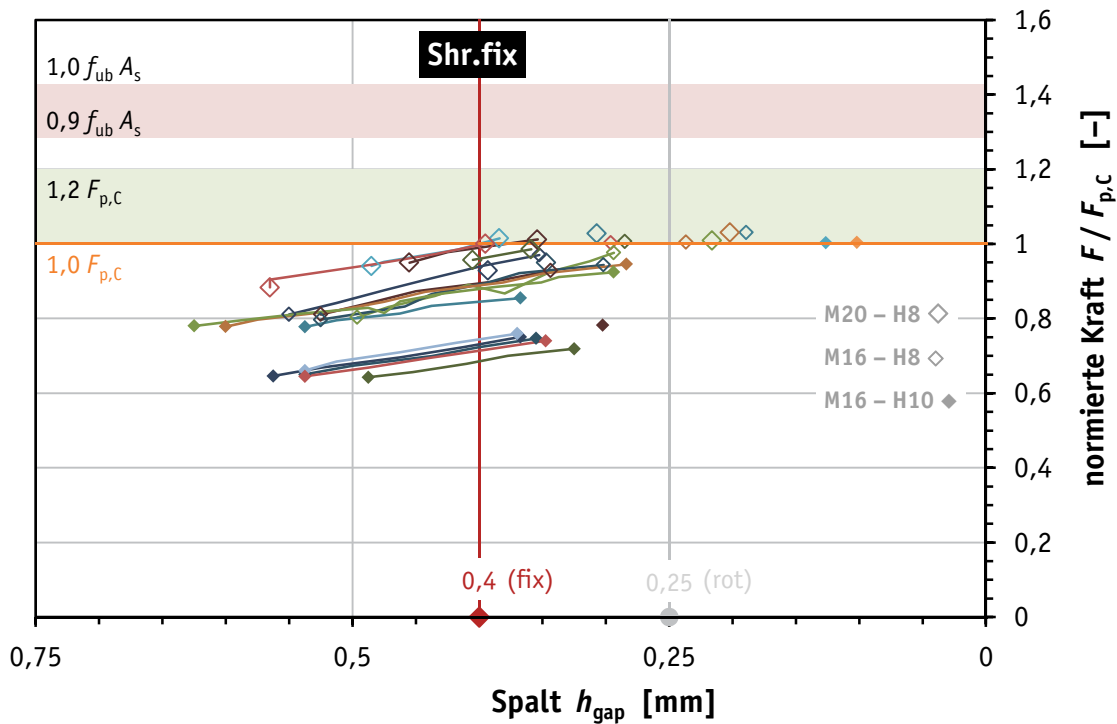
Das Last-Verformung-Verhalten des DTI ist für den Anziehvorgang analog zu den Anziehversuchen, vgl. Kapitel 4.4.3.3, in den Bildern 4.49 und 4.50 dargestellt. Die Bewertungen entsprechend den Tabellen 4.17 und 4.18 werden so veranschaulicht und bestätigt. Im Gegensatz zu den Spalt-Kraft-Kurven aus den Anziehversuchen enden die Anziehvorgänge mit dem Erreichen des Fühllehren-Kriteriums oder der Mindestvorspannkraft. Das jeweilige Montagekriterium ist in den Tabellen 4.17 und 4.18 enthalten (Sp. 5). Einige Prüfkörper wurden in einem einzelnen Anziehschritt auf das festgelegte Vorspannkraftniveau angezogen (Sp. 6). Jeweils ein einzelnes Markierungssymbol dokumentiert dies in den Bildern.

Die Spalt-Kraft-Kurven der einzelnen Serien sind zusammen mit den Kurven der entsprechenden Drucklastversuche zusätzlich in den Bildern 4.55 bis 4.58 dargestellt. Anhang C.3 enthält die dargestellten Daten in tabellarischer Form.

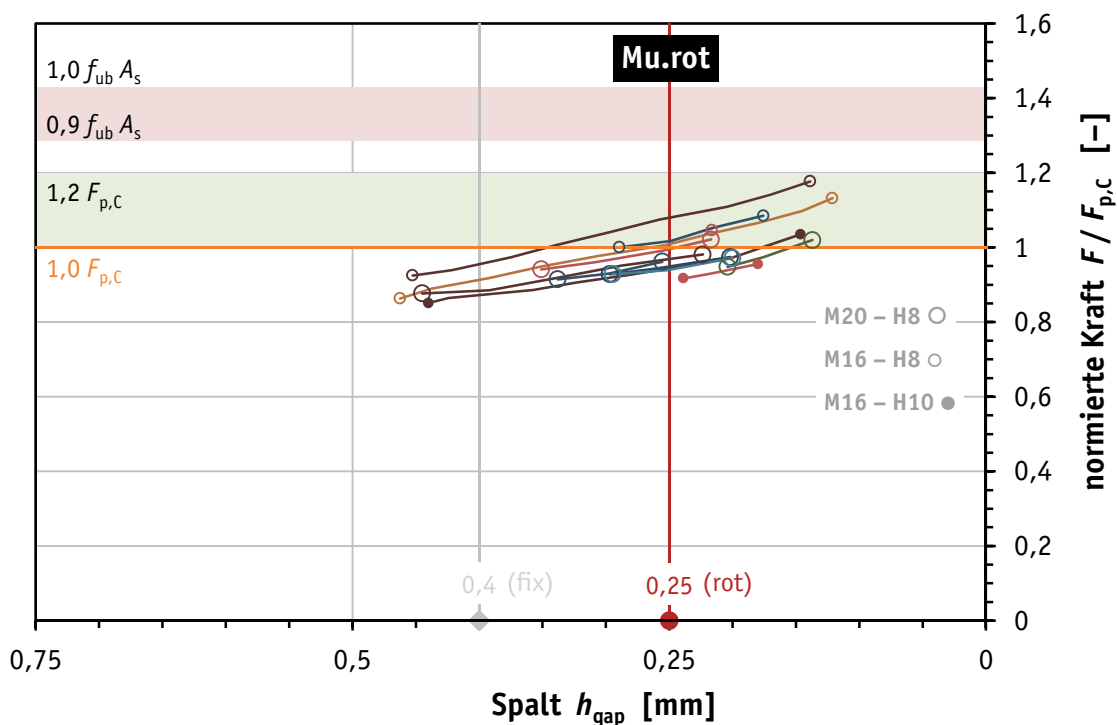
#### 4.5.4.4 Vorspannkraftverluste durch Setzen nach der Montage

Die unmittelbar nach Abschluss der Montage auftretenden Vorspannkraftverluste sind durch das Setzen, d.h. das plastische Einebnen der Oberflächenrauigkeiten in allen gepaarten Oberflächen bedingt. Die Überstände der direkten Kraftanzeiger unterliegen einer besonders großen Flächenpressung, die zu ihrer planmäßigen plastischen Verformung führt. Inwieweit die große Flächenpressung auf den kleinen Querschnittsflächen der Überstände bei einem vorhandenen Restspalt nach Abschluss des Anziehvorgangs ein zeitabhängiges Kriechen und den damit verbundenen Verlust an Vorspannkraft verursacht, zeigen die folgenden Auswertungen.

Die erzielten bzw. eingestellten Montagevorspannkraften sind in Anhang C.3 für jede Prüfung dokumentiert. Bild 4.44 (a) zeigt exemplarisch die Definition des Nullpunktes der Zeitachse, wie sie für die zeitabhängige Erfassung der Schraubenkräfte nach Abschluss des Anziehvorgangs nachfolgend verwendet wird. Die Darstellung der Anziehvorgänge in Bild 4.44 (b) und (c) wurde nur mit einer Staffelung in Inkrementen von fünf Minuten versehen, um die Übersichtlichkeit zu erhöhen. Für alle Prüfungen ist der Nullpunkt der Zeitachse entweder mit dem Maximum der Schraubenkraft oder dem Abschluss eines erforderlichen geringfügigen LöSENS gegeben. Ein LöSEN war nur für wenige Prüfungen ohne DTI nötig.



**Bild 4.49.** Spalt-Kraft-Diagramm für Zugversuche in der Montagekonfiguration Shr.fix  
**Figure 4.49.** Gap-load-diagram for the component tensile tests of the configuration Shr.fix



**Bild 4.50.** Spalt-Kraft-Diagramm für Zugversuche in der Montagekonfiguration Mu.rot  
**Figure 4.50.** Gap-load-diagram for the component tensile tests of the configuration Mu.rot



Die tabellarische und grafische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Schraubenkräfte nach Abschluss des Anziehvorgangs ist in Anhang C.4 zusammengestellt. Die Diagramme enthalten die Schraubenkräfte an den tabellierten diskreten Zeitpunkten  $t$  nach dem finalen Anziehschritt, in dem die Montagevorspannkraft  $F_M$  erreicht wurde. Die gegebenen Schraubenkräfte ergänzen somit die Auslassungen in den grafischen Darstellungen entsprechend Anhang C.3 bzw. Bild 4.48.

Die Differenz zwischen der Montagevorspannkraft  $F_M$  und der zeitabhängigen Schraubenkraft  $F_S(t)$  entspricht dem Vorspannkraftverlust. Der relative Vorspannkraftverlust in Prozent ist als das Verhältnis von Vorspannkraftverlust zu Montagevorspannkraft definiert. Bild 4.51 zeigt den relativen Vorspannkraftverlust über der Zeit in logarithmischer Darstellung. Grundsätzlich ist der Unterschied zwischen den vorgespannten Verbindungen mit und ohne DTI ersichtlich. Für die Verbindungen ohne direkten Kraftanzeiger wurden unmittelbar nach Abschluss des Anziehens (zehn Sekunden danach) Vorspannkraftverluste von bis zu einem Prozent registriert. Die Verbindungen mit DTI zeigten nach zehn Sekunden hingegen Vorspannkraftverluste zwischen 3 % und 6 %.

Die überwiegende Anzahl der vorliegenden Messungen der Schraubenkraft erfolgte kontinuierlich über mindestens zwölf Stunden. Für diese Prüfkörper wurden aus den relativen Vorspannkraftverlusten Mittelwertkurven zwischen den Zeitpunkten „10 s“ und „12 h“ ermittelt. Es bestätigte sich dabei der optische Eindruck entsprechend Bild 4.51, dass die Unterschiede einzelner Mittelwertkurven innerhalb der Prüfserien mit DTI nicht signifikant sind. Somit wird auf eine weitere Differenzierung zwischen den Nenndurchmessern (M16, M20), den Festigkeitsklassen (H8, H10) sowie den Losen (A10, A11) verzichtet und für alle Prüfkörper mit DTI eine gemeinsame Mittelwertkurve bestimmt, siehe Bild 4.51. Analog hierzu erfolgte auch die Bestimmung der Mittelwertkurve gemeinsam für alle Prüfkörper ohne DTI. Aufgrund der begrenzten Anzahl von Prüfergebnissen ist die systematische Untersuchung der Einflussparameter Klemmlängenverhältnis, Vorspannkraftniveau und Montagekonfiguration an dieser Stelle nicht möglich.

Die Regressionsanalyse der Mittelwertkurven liefert zwei Regressionsfunktionen, eine für die Verbindung mit DTI, eine für diejenige ohne DTI, siehe Bild 4.51. Da sämtliche Komponenten der Verbindung, außer des DTI, in den Prüfungen mit und ohne DTI wiederverwendet wurden und beim Entfallen des DTI diese durch eine herkömmliche Scheibe ersetzt wurde, ist davon auszugehen, dass die Vorspannkraftverluste in sämtlichen Trennfugen fernab des DTI nahezu iden-

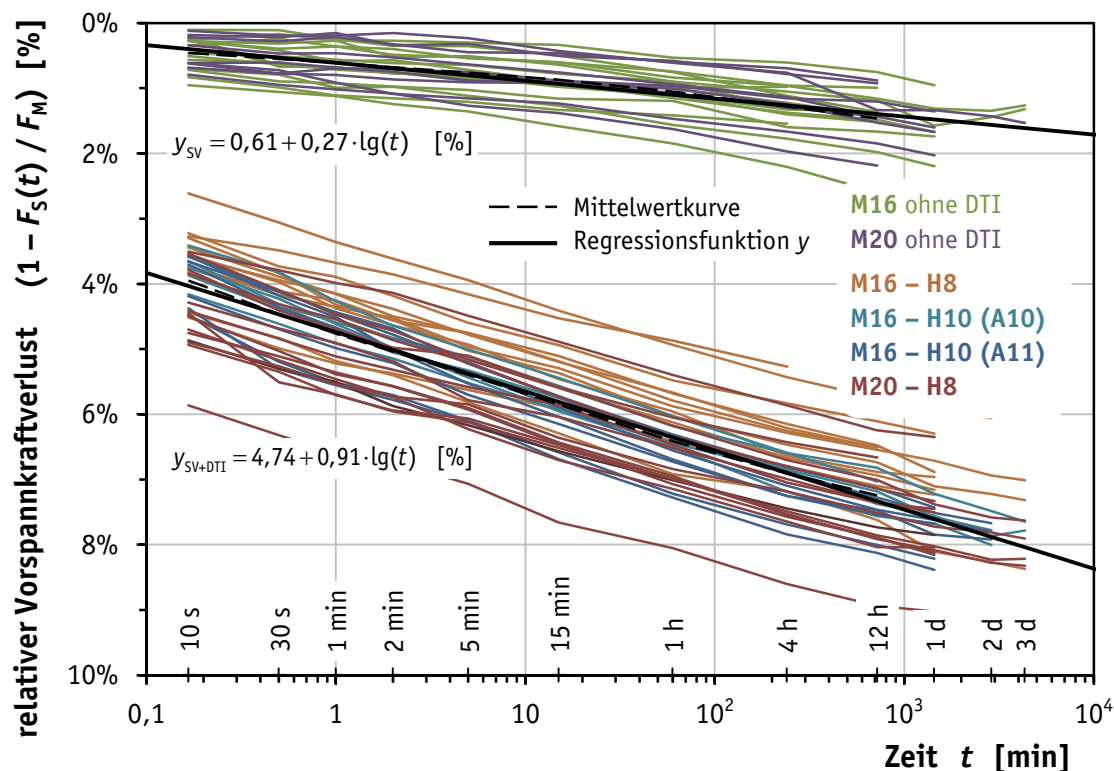
tisch sind. Somit sind die Vorspannkraftverluste bedingt durch sämtliche Komponenten, außer dem DTI, in beiden Gruppen von Prüfergebnissen und den resultierenden Regressionsfunktionen enthalten. Die Differenz der Regressionsfunktionen für die Verbindungen mit und ohne DTI stellt daher eine gute Abschätzung des Einflusses des direkten Kraftanzeigers auf die Vorspannkraftverluste der unbelasteten Verbindung dar.

Der reine mittlere relative Vorspannkraftverlust infolge Setzens und Kriechens des direkten Kraftanzeigers in der vorgespannten Verbindung beträgt:

$$\Delta y_{\text{DTI}} = 4,13 + 0,63 \cdot \lg(t) \quad [\%] \quad (4.2)$$

Dabei ist  $t$  das Alter der vorgespannten Verbindung in Minuten, siehe Bild 4.52.

Um Vorspannkraftverluste über einen Zeitraum abzuschätzen, der über die Überwachungsdauer der durchgeführten Prüfungen hinausgeht, ist die Extrapolation der ermittelten logarithmischen Regressionsfunktion möglich. Eine ähnliche Vorgehensweise wurde in [VFN10] und [SSG14] gewählt. Bild 4.52 zeigt die

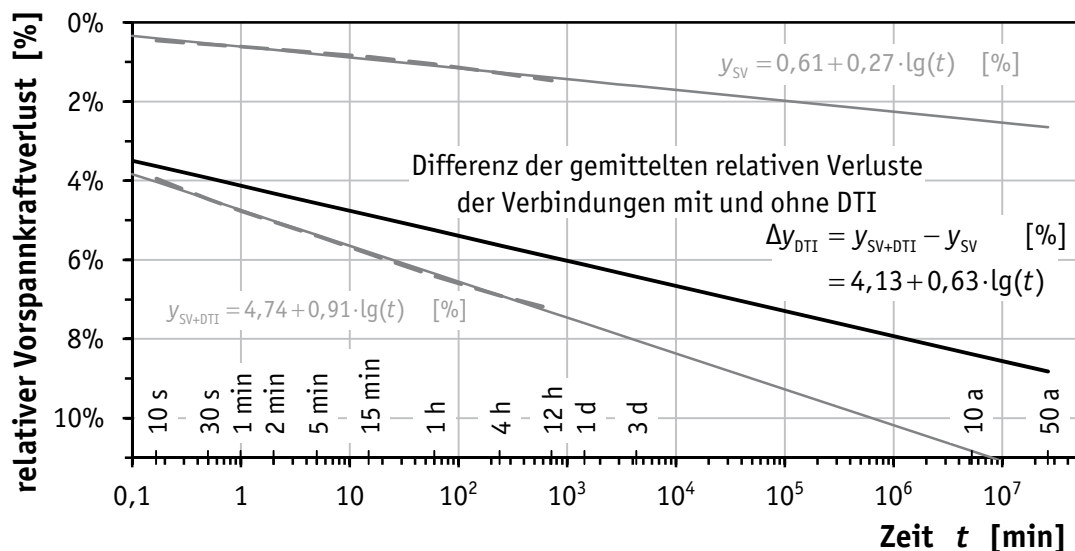


**Bild 4.51.** Relative Vorspannkraftverluste für Verbindungen mit und ohne DTI nach Abschluss des finalen Anziehschritts

**Figure 4.51.** Relative losses of preload of joints with and without DTI after finishing the final tightening step

Abschätzung der zusätzlichen reinen Vorspannkraftverluste infolge des Setzens und Kriechens des DTI. Für ein Alter der vorgespannten Verbindung von einer Minute beträgt der relative Vorspannkraftverlust bedingt durch den direkten Kraftanzeiger 4 %. Der extrapolierte relative Vorspannkraftverlust eines direkten Kraftanzeigers beträgt theoretisch für eine unbeanspruchte vorgespannte Verbindung im Alter von 50 Jahren etwa 9 %.

Für eine ausgeführte vorgespannte Verbindung sind zusätzlich hierzu weitere Anteile von Vorspannkraftverlusten durch das Setzen und Kriechen in allen übrigen Trennfugen und Kontaktflächen zu berücksichtigen, so dass die Vorspannkraft darüber hinaus reduziert wird. Insbesondere Oberflächenbeschichtungen zum Schutz vor Korrosion sind hinsichtlich des Kriechens abhängig von Art und Schichtdicke besonders zu beachten, vgl. [KPS96] und [SZB12]. Die Verwendung der festgestellten Vorspannkraftverluste aus den Verbindungen ohne DTI zur Abschätzung weiterer Anteile der Vorspannkraftverluste ist ausnahmslos ungeeignet, da die mehrfach verwendeten Komponenten kleinere Vorspannkraftverluste erleiden und die Vorspannkörper hinsichtlich Werkstoff und Oberflächenausführung nicht stahlbautypisch sind. Die Vorspannkraftverluste würden dadurch unterschätzt.



**Bild 4.52.** Reiner mittlerer relativer Vorspannkraftverlust des DTI, abgeschätzt durch Extrapolation der Regressionsfunktion

**Figure 4.52.** Pure mean relative loss of preload of the DTI, estimated by extrapolation of the regression function

#### 4.5.4.5 Vorspannkraftverluste durch Schraubenzusatzkräfte

Der Einfluss von Schraubenzusatzkräften auf den Erhalt der Vorspannkraft wird anhand von ausgewählten Prüfungen, die jeweils eine Gruppe von Prüfungen charakterisieren, in Bild 4.53 exemplarisch dargestellt. Für die Darstellung der Kurve einer Prüfung sind die signifikanten Schraubenkräfte eines Lastwechsels entsprechend Tabelle 4.15 (Spalten 9 und 16) bzw. Anhang C.3 aufgetragen. Die maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$ , zusammengesetzt aus der Vorspannkraft und der Schraubenzusatzkraft unter Axialkraft, ist normiert auf den Bemessungswert der Zugtragfähigkeit  $F_{t,Rd}$  auf der Abszisse aufgetragen. Diese ursächliche Beanspruchung der Verbindung wirkt sich auf die minimale Schraubenkraft  $F_{S,min}$ , d.h. auf die verbleibende Vorspannkraft  $F_V$  nach der Entlastung von der Axialkraft in unterschiedlichen Formen aus, siehe Bild 4.53. Die Vorspannkraft  $F_{S,min}$  der unbelasteten Verbindung ist beginnend mit der maximalen Montagevorspannkraft  $F_M$  (Punkt M) und der Vorspannkraft  $F_{S,ini}$  unmittelbar vor Beginn des Zugversuchs (Punkt 0) auf der Ordinate aufgetragen. Diese Schraubenkräfte sind normiert bezüglich der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$ . Die prinzipiellen experimentellen Befunde und Erläuterungen zu Bild 4.53 sind in Tabelle 4.20 zusammengestellt, die zugleich die Legende zu den Eintragungen in Bild 4.53 darstellt.

Der Verlauf der Schraubenkraft unter den durchgeführten Lastwechseln ist für jede einzelne Prüfung serienweise in Anhang C.5 analog zu Bild 4.53 dargestellt. Die Grundlage dazu legen die tabellierten Ergebnisse der einzelnen Lastwechsel entsprechend Anhang C.3.

Tabelle 4.19 zeigt exemplarisch für die Prüfkörper aus Bild 4.53 die Wirkung der Schraubenzusatzkraft aus Axialkraft anhand des jeweils letzten Lastwechsels. Dieser ist selbstverständlich auch durch die vorhergehende Belastungsgeschichte geprägt. Da diese für die durchgeführten Prüfungen weitestgehend identisch ist, ist der letzte Lastwechsel zum Vergleich verschiedener Prüfungen geeignet.

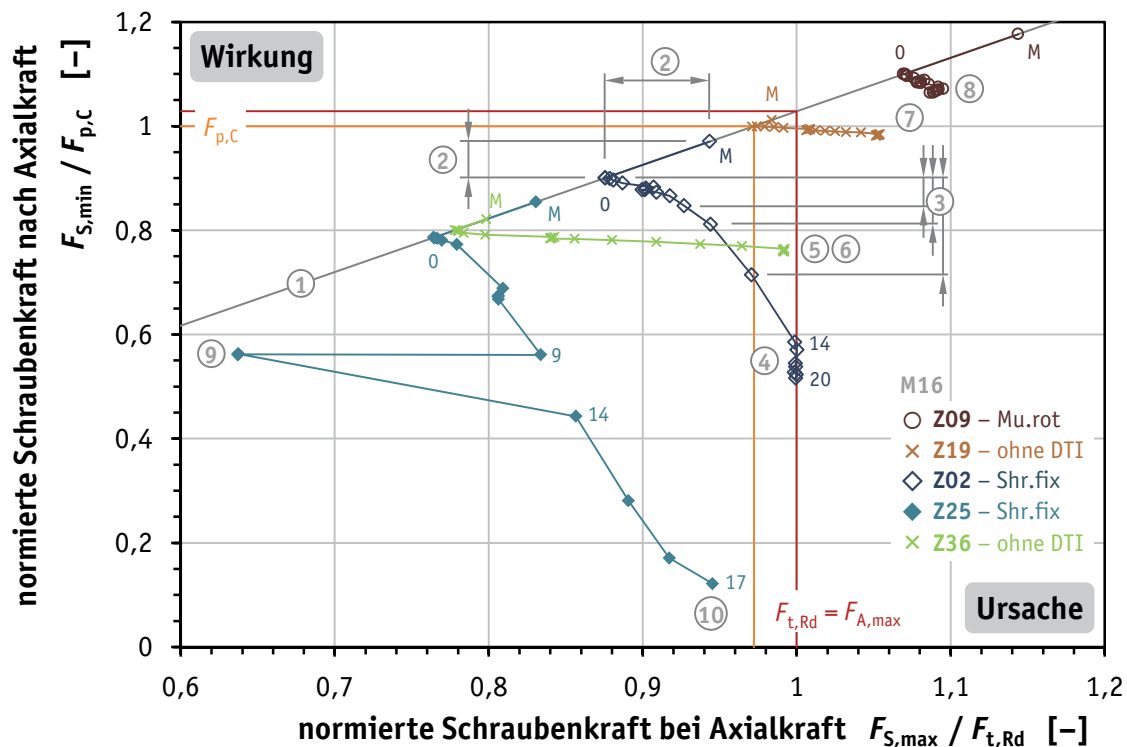
Mit einer Montagevorspannkraft von  $1,18 F_{p,c}$  war der Prüfkörper Z09 regelkonform vorgespannt, siehe Tabelle 4.19, Spalte 6. Der Setzkraftverlust in der unbeanspruchten Verbindung reduzierte die Vorspannkraft auf ein Niveau von  $1,1 F_{p,c}$ , siehe Spalte 7. Unter der einwirkenden Beanspruchung  $F_A = F_{t,Rd}$  (Spalte 8) war weiterhin eine ausreichend große Schraubenkraft  $F_{S,max}$  vorhanden, so dass die Trennfuge der Bauteile nicht aufklaffte, siehe Spalten 9 und 10. Zugleich lag diese maximale Schraubenkraft unter Axialkraft unterhalb der Montagevorspannkraft  $F_M$ , siehe Spalte 12. Die Montagevorspannkraft wurde unter Axialkraft

zu 5 % unterschritten, siehe Spalte 15. Daraus resultierte ein relativer Vorspannkraftverlust von 3,2 % bezogen auf die Vorspannkraft  $F_{S,ini}$  unmittelbar vor Beginn des Zugversuchs, siehe Spalten 14 und 16. Aufgrund der deutlichen Überschreitung der Mindestvorspannkraft bei der Montage ist nach den vollzogenen Lastwechseln eine Vorspannkraft von  $1,06 F_{p,c}$  erhalten geblieben, siehe Spalte 13.

Aus der Gruppe der Vergleichsprüfungen ohne DTI ist der Prüfkörper Z19 für eine Vorspannkraft  $F_{S,ini} = F_{p,c}$  montiert worden. Die Montagevorspannkraft war unwesentlich größer, da die Vorspannkraftverluste für die Verbindungen ohne DTI gering waren, vgl. Kapitel 4.5.4.4. Die Schraubenkraft unter Axialkraft übertraf infolge der wirkenden Schraubenzusatzkraft die Montagevorspannkraft um 6,9 %. Dies ist in Tabelle 4.19, Spalte 15 als Überlast bezeichnet. Im direkten Vergleich zeigte der Prüfkörper Z02 mit DTI eine ähnliche Überlast von 5,9 %. Diese resultierte allerdings nicht aus der Schraubenzusatzkraft bei überdrückter Trennfuge, sondern aus der geringeren Montagevorspannkraft  $F_M$  von  $0,97 F_{p,c}$  und dem Erreichen der Axialkraft  $F_A = F_{t,Rd}$  bei klaffender Trennfuge.

Die vergleichbare Überlast bezogen auf die Montagevorspannkraft hatte für die Verbindung mit DTI eine erhebliche Wirkung. Es entstand ein Vorspannkraftverlust von 43 %, siehe Tabelle 4.19. Demgegenüber waren für die Verbindung ohne DTI nur Verluste von 1,8 % zu verzeichnen.

Falls die Montagevorspannkraft erheblich unter der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  liegt, sind noch größere Vorspannkraftverluste festzustellen. Prüfkörper Z25 erreichte beim Anziehen mit dem Fühllehren-Kriterium nur eine Montagevorspannkraft von  $0,85 F_{p,c}$ . Obwohl im letzten durchgeführten Lastwechsel nur eine Axialkraft von  $0,97 F_{t,Rd}$  aufgebracht wurde, ist ein Vorspannkraftverlust von 85 % bei einer Überlast von 14 % festgestellt worden. Der Prüfkörper Z36 ohne DTI zeigte bei einer noch geringeren Montagevorspannkraft und einer resultierenden Überlast von 24 % nur einen Vorspannkraftverlust von 5,2 %, der auf die Lageänderungen beim Öffnen und Schließen der Trennfuge zurückzuführen ist. Bei den Prüfkörpern mit wiederholtem Klaffen der Trennfuge waren nach dem Ausbau aus der Prüfvorrichtung Verschiebungen der beiden noch vorgespannten Teile des Vorspannkörpers gegeneinander zwar nur schlecht sichtbar, dafür allerdings an der Trennfuge fühlbar.



**Bild 4.53.** Einfluss von Axialkräften auf den Erhalt der Vorspannkraft – Erläuterung der experimentellen Befunde anhand ausgewählter Prüfungen

**Figure 4.53.** Effect of axial loads on the preservation of the preload – explanation of experimental results based on selected tests

**Tabelle 4.19.** Vorspannkraftverluste nach wechselnder Beanspruchung durch Axialkraft – Prüfungen entsprechend Bild 4.53

**Table 4.19.** Loss of preload as a result of cyclic loading by an axial load – tests according to Figure 4.53

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Prüfung Nr.	DTI Nr.	Montagekonfiguration	Montagekriterium	Lastwechsel Nr.	Montage		Belastung				Entlastung		Überlast		Verlust
					$F_M / F_{p,c}$	$F_{S,ini} / F_{p,c}$	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_{S,max} / F_A$	Klaffen	$F_{S,max} / F_{p,c}$	$F_{S,max} / F_M$	$F_{S,min} / F_{p,c}$	$F_{S,min} / F_{S,ini}$	$F_{S,max} / F_M - 1$	
					[-]	[-]	[-]	[-]		[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[%]
Z09	23	Mu.rot	0,25	18	1,18	1,10	1,0	1,09		1,12	0,95	1,06	0,97	-5,0%	3,2%
Z19	ohne DTI	$F_{p,c}$	20		1,01	1,00	1,0	1,06		1,08	1,07	0,98	0,98	6,9%	1,8%
Z02	11	Shr.fix	0,4	20	0,97	0,90	1,0	1,0	=	1,03	1,06	0,52	0,57	5,9%	43%
Z25	6	Shr.fix	0,4	17	0,85	0,79	0,97	0,97	=	0,97	1,14	0,12	0,15	14%	85%
Z36	ohne DTI	$F_v$	20		0,82	0,80	1,0	0,99	=	1,02	1,24	0,76	0,95	24%	5,2%

**Tabelle 4.20.** Erläuterungen und Legende zu Bild 4.53**Table 4.20.** Explanations and key to Figure 4.53

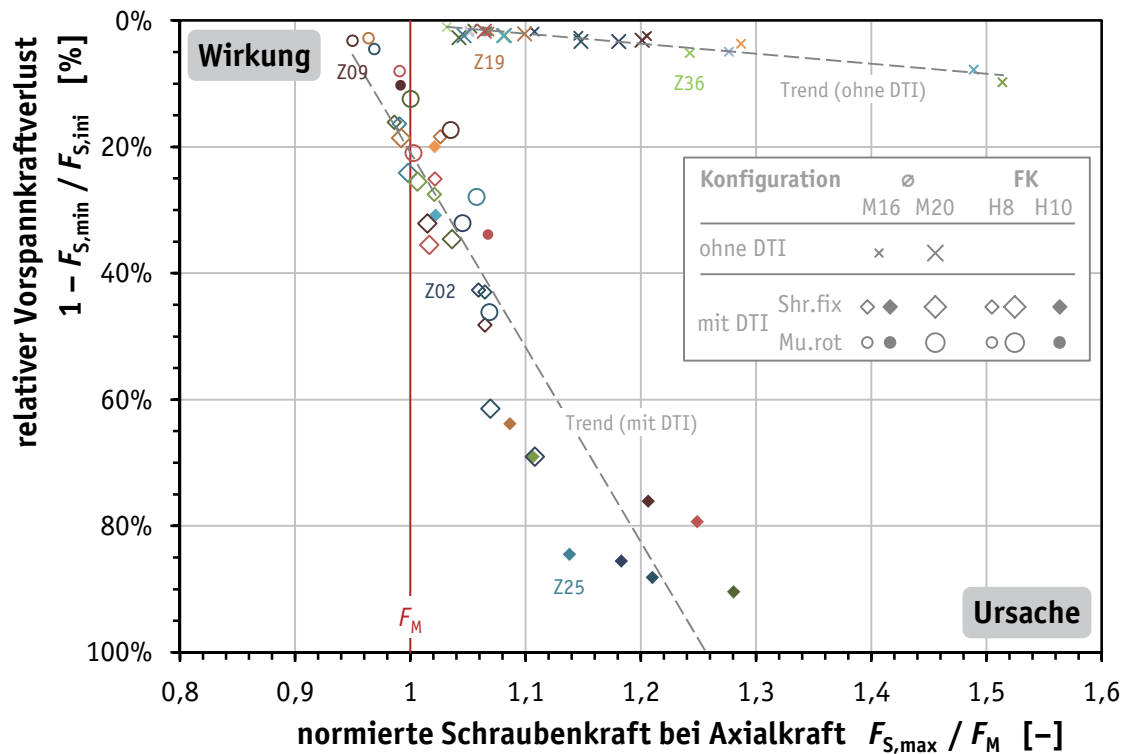
<b>1</b>	Gerade, auf der alle Auswertestellen vor Beginn des Zugversuchs liegen und für die gilt: $F_{S,min} = F_{S,max}$ und $F_A = 0$
<b>2</b>	Vorspannkraftverlust zwischen finalem Anziehschritt der Montage ( $F_M$ ) und Beginn des Zugversuchs ( $F_{S,ini}$ ), vgl. Kapitel 4.5.4.4.
<b>3</b>	Progressive Zunahme der Vorspannkraftverluste für Verbindungen mit DTI beim Überschreiten der anfänglich vorhandenen Montagevorspannkraft $F_M$ durch die Schraubenkraft ( $F_{S,max} > F_M$ ).
<b>4</b>	Fortschreitender Vorspannkraftverlust bei Wiederholung identischer Lastwechsel (Nr. 14 bis 20) mit klaffender Trennfuge ( $F_{S,max} = F_A = F_{t,Rd}$ ) bedingt durch den DTI, vgl. 5.
<b>5</b>	Kein signifikanter Vorspannkraftverlust bei Verbindungen ohne DTI bei Wiederholung identischer Lastwechsel (Nr. 14 bis 20) mit klaffender Trennfuge ( $F_{S,max} = F_A = F_{t,Rd}$ ).
<b>6</b>	Für Laststufen mit $F_A = F_{t,Rd}$ und klaffender Trennfuge gilt: $F_{S,max} = F_A = F_{t,Rd}$ . Die vorliegende Messabweichung ( $F_{S,max} < F_{t,Rd}$ ) ist vermutlich auf Biegung in der instrumentierten Prüfschraube zurückzuführen, vgl. Kapitel 4.6.
<b>7</b>	Bei ausreichend hoher Vorspannkraft tritt bei Erreichen von $F_A = F_{t,Rd}$ kein Klaffen der Trennfuge auf ( $F_{S,max} = F_V + F_{SA} > F_A$ ).
<b>8</b>	Vergleichsweise geringe Vorspannkraftverluste in Verbindungen mit DTI bei Schraubenkräften unterhalb der Montagevorspannkraft ( $F_{S,max} < F_M$ ), vgl. 3. Der Erhalt der Vorspannkraft ist in diesem Fall durch die hohe Montagevorspannkraft ( $F_M > F_{p,C}$ ) und die noch ausreichend hohe Vorspannkraft bei Beginn des Zugversuchs ( $F_{S,ini} > F_{t,Rd}$ ) gewährleistet. Der geringere Restspalt der Überstände bei Anwendung des DTI auf der Seite der gedrehten Mutter ( <i>Mu.rot</i> ) wirkt sich zudem positiv aus.
<b>9</b>	Keine Vorspannkraftverluste aus Lastwechseln mit kleineren resultierenden Schraubenkräften $F_{S,max}$ als zuvor in der Belastungsgeschichte bereits erreicht, hier aus Lastkollektiv Typ 3 (Typ 2 analog).
<b>10</b>	Ende des Zugversuchs mit einer Laststufe $F_A < F_{t,Rd}$ , da die Vorspannkraft fast vollständig verloren ist.

Die maßgebenden Anteile der Vorspannkraftverluste der Prüfkörper mit DTI sind dem direkten Kraftanzeiger zuzuschreiben. Die Prüfungen ohne DTI zeigten vielfach geringere Vorspannkraftverluste. Dies ist anhand der tabellierten Ergebnisse aller Prüfungen in Anhang C.5 analog zu Tabelle 4.19 ersichtlich. In den Tabellen C.102 bis C.104 ist die Wirkung der Belastungsgeschichte mit dem jeweils letzten Lastwechsel komprimiert zusammengestellt. Die daraus generierte grafische Darstellung zeigt Bild 4.54. Jede Prüfung ist durch den relativen Vorspannkraftverlust nach dem letzten Lastwechsel repräsentiert. Der Vorspannkraftverlust ist dabei bezogen auf die Vorspannkraft  $F_{S,ini}$  vor Beginn des Zugversuchs. Eine ganz klare Abhängigkeit zur Höhe der maximalen Schraubenkraft  $F_{S,max}$  unter Axialkraft bezogen auf die Montagevorspannkraft  $F_M$  ist zu erkennen. Für die beiden Konfigurationen mit und ohne DTI verdeutlichen dies optisch die beiden eingezeichneten Trendlinien. Ein strenger funktionaler Zusammenhang im Sinne einer Regressionsgeraden ist aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Prüfkörper nicht ableitbar. Insbesondere die variierenden Klemmlängenverhältnisse sowie die unterschiedlichen Montagekriterien erschweren dies.

Für die durchgeführten Prüfungen ist ersichtlich, dass das erneute Erreichen der Montagevorspannkraft  $F_M$  durch die Schraubenkraft  $F_{S,max}$  unter einwirkender Axialkraft einen Vorspannkraftverlust von mindestens 10 % verursachte, der auf den vorhandenen direkten Kraftanzeiger zurückzuführen ist. Beim ebenso baupraktisch relevanten Anstieg der Schraubenkraft auf  $1,05 F_M$  liegt der Vorspannkraftverlust sogar bei über 30 %, siehe Bild 4.54. Für die Prüfkörper ohne DTI waren bei deutlichem Überschreiten der Montagevorspannkraft wesentlich geringere Verluste zu verzeichnen. Bis zu einer maximalen Schraubenkraft von  $1,2 F_M$  waren dies Verluste von weniger als 4 %.

Die beiden extremen Vorspannkraftverluste der Prüfkörper Z32 und Z33 ohne DTI von etwa 10 % wurden bei einer außerordentlich hohen Schraubenkraft von etwa  $1,5 F_M$  festgestellt. Für den Prüfkörper Z32 wurde dies durch eine unplanmäßig hohe Axialkraft zu Beginn des Zugversuchs von  $1,2 F_{t,Rd} = 0,96 F_{y,k}$  verursacht, siehe Bild C.34 und Tabelle C.57. Die Schraubengarnitur wurde auf diesem Lastniveau erstmalig beansprucht. Die nachfolgenden Lastwechsel auf geringeren Lastniveaus zeigten keinen weiteren Beitrag zum festgestellten Vorspannkraftverlust. Für Prüfkörper Z33 wurden kontinuierlich anwachsende Vorspannkraftverluste beobachtet, die durch das erhebliche wiederholte Klaffen der Trennfuge aufgrund der geringen Vorspannkraft von  $0,67 F_{p,c}$  bei Versuchsbeginn verursacht wurden, siehe Bild C.35 und Tabelle C.58.





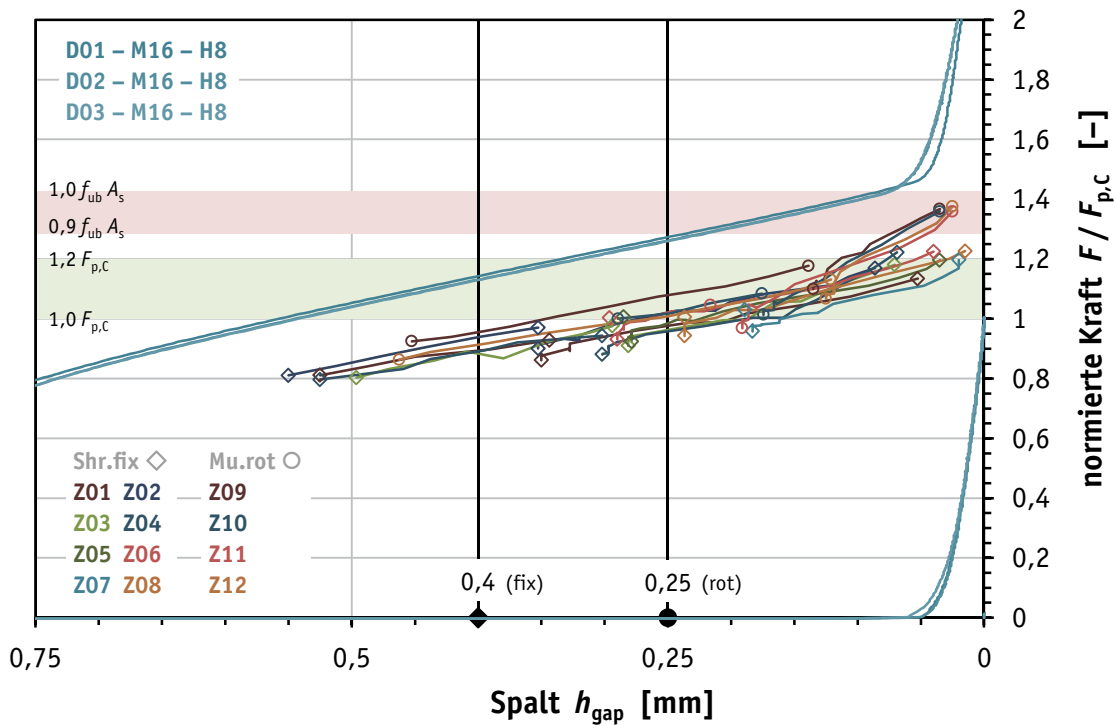
**Bild 4.54.** Relative Vorspannkraftverluste nach wechselnder Beanspruchung durch Axialkraft

**Figure 4.54.** Relative loss of preload as a result of cyclic loading by an axial load

#### 4.5.4.6 Last-Verformung-Verhalten des DTI unter Zugbeanspruchung

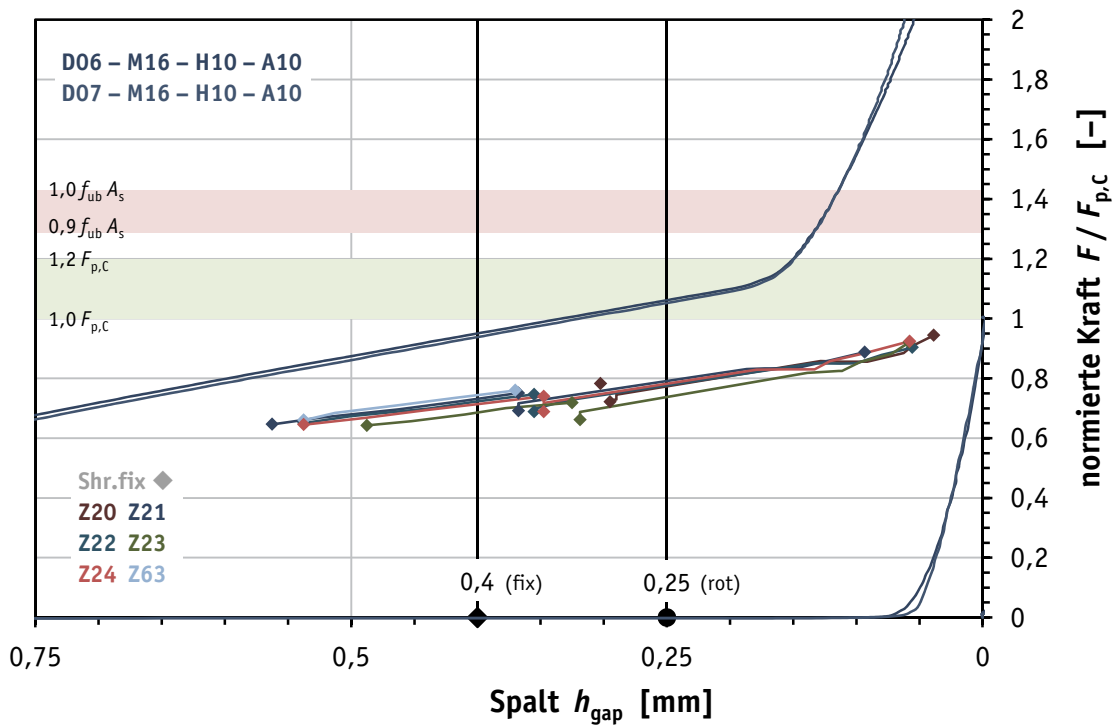
In Ergänzung zur Erfassung des Last-Verformung-Verhaltens des DTI im Anziehvorgang entsprechend Kapitel 4.5.4.3 erfolgte das Ausmessen der Spalte mit einer Palette von Fühllehren auch in den Bauteil-Zugversuchen. Bei jeder Oberlast eines Lastwechsels wurden die Höhen aller Spalte protokolliert. Die gemittelten Höhen  $h_{gap,m}$  der Spalte sind analog in Form der Spalt-Kraft-Kurven in den Bildern 4.55 bis 4.58 für jede Serie dargestellt.

Die zweiteilige Kurve jeder Prüfung besteht aus dem Anziehvorgang, vgl. Kapitel 4.5.4.3, der beim entsprechenden Montagekriterium abgebrochen wurde, und der wechselnden Zugbeanspruchung der Vorspannkörper. An der Unterbrechung der Kurve werden die Vorspannkraftverluste durch das Setzen nach der Montage sichtbar, vgl. Kapitel 4.5.4.4. Der festgestellte gemittelte Spalt blieb in der Regel unverändert, da innerhalb der verwendeten Abstufung der Fühllehren nicht jede Veränderung nachweisbar war. Geringe Abnahmen der gemittelten Höhe  $h_{gap,m}$  wurden teilweise festgestellt.



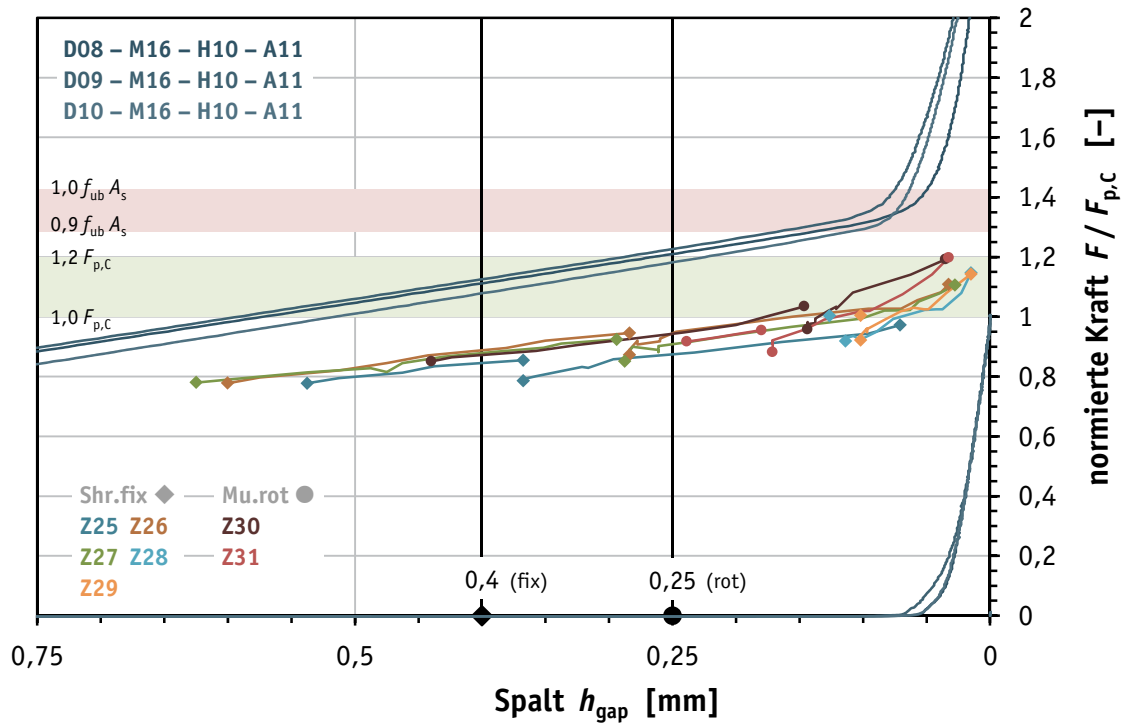
**Bild 4.55.** Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M16-H8-AND-A1 (Zv und Dv im Vergleich)

**Figure 4.55.** Gap-load-diagram for M16-H8-AND-A1 series (Zv and Dv in comparison)



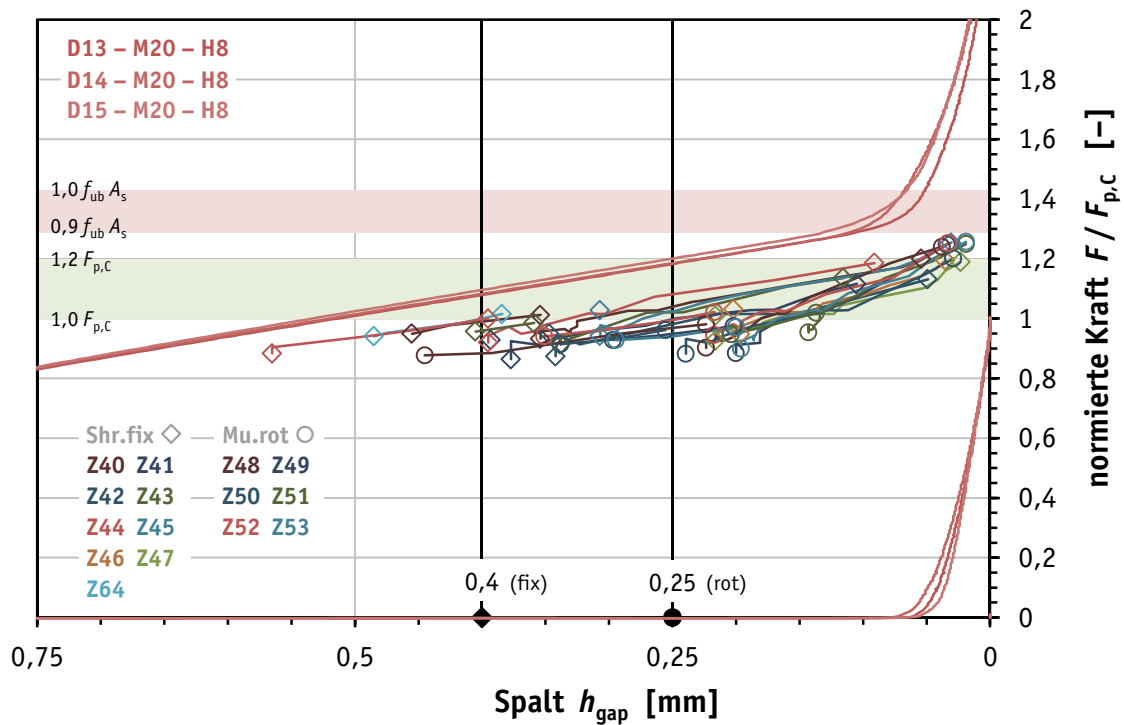
**Bild 4.56.** Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M16-H10-TS-A10 (Zv und Dv im Vergleich)

**Figure 4.56.** Gap-load-diagram for M16-H10-TS-A10 series (Zv and Dv in comparison)



**Bild 4.57.** Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M16-H10-TS-A11 (Zv und Dv im Vergleich)

**Figure 4.57.** Gap-load-diagram for M16-H10-TS-A11 series (Zv and Dv in comparison)



**Bild 4.58.** Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M20-H8-AND-A2 (Zv und Dv im Vergleich)

**Figure 4.58.** Gap-load-diagram for M20-H8-AND-A2 series (Zv and Dv in comparison)

Um eine möglichst große Abplattung der Überstände und die daraus resultierenden Vorspannkraftverluste zu erzielen, wurde die Axialkraft  $F_A$  teilweise über den Bemessungswert der Zugtragfähigkeit  $F_{t,Rd}$  hinaus gesteigert, vgl. exemplarisch Bild 5.15 gegenüber Bild 4.53. Der daraus ermittelte Verlauf der Spalt-Kraft-Kurven zeigt an der Schnittstelle von Anziehvorgang zu Zugbeanspruchung keine signifikante Änderung des Gradienten. Die Unstetigkeit durch den Vorspannkraftverlust während der unbelasteten Überwachungsphase ist allerdings vorhanden, siehe Bilder 4.55 bis 4.58.

Das Last-Verformung-Verhalten des direkten Kraftanzeigers in der vorgespannten Verbindung – im Anziehvorgang und unter Zugbeanspruchung – zeichnet sich durch einen gleichmäßigen Gradienten der Spalt-Kraft-Kurven über den beobachteten Abplattvorgang aus. Erst mit dem nahenden vollständigen Abplatten der Überstände ist ein Anstieg des Gradienten ersichtlich, siehe Bilder 4.55 bis 4.58.

Grundsätzlich verlaufen die Spalt-Kraft-Kurven der Anziehvorgänge „unterhalb“ der Kurven der Drucklastversuche, siehe Bilder 4.55 bis 4.58, und zwar in vergleichbarer Art und Weise wie die Spalt-Kraft-Kurven der Anziehversuche, siehe Bilder 4.35 bis 4.38. Daher wird zur weiteren Erläuterung der Beobachtungen und Benennung möglicher Ursachen auf Kapitel 4.4.3.3 verwiesen.

Da zwischen den Abschnitten des Anziehvorgangs und der Zugbeanspruchung keine signifikante Änderung des Gradienten der Spalt-Kraft-Kurve zu beobachten ist, obwohl die ungünstige Beeinflussung durch das Drehen entfällt und die Kurven aus dem Drucklastversuch zum einen sowie die Kurven aus den Anzieh- und Zugversuchen zum anderen weitestgehend parallel verlaufen, ist davon auszugehen, dass die entscheidenden Vorgänge, die zum Divergieren der Kurven führten, im Anfangsbereich der Belastung des DTI zu finden sind. Dieser ist allerdings nicht durch die Anwendung der Fühllehren erfasst worden. Eine eingehende Untersuchung ist mit den vorliegenden Aufzeichnungen nicht möglich.

Der mögliche aber untergeordnete Einfluss des regulären Prüfablaufs nach EN 14399-9 mit dem festgelegten Abgleich des Nullpunkts der Spalt-Druckkraft-Kurve wurde zuvor bereits angesprochen, vgl. Kapitel 4.4.3.3.

### 4.5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

#### Montagevorspannkkräfte

Die bei der Montage der Prüfkörper für den Bauteil-Zugversuch unter Berücksichtigung des entsprechenden Fühllehren-Kriteriums gewonnenen Montagevorspannkkräfte erreichten in der Mehrzahl die Mindestvorspannkraft nicht, siehe Tabellen 4.17 und 4.18. Dabei waren die Vorspannkkräfte in der Montagekonfiguration *Shr.fix* wesentlich geringer gegenüber denjenigen in der Konfiguration *Mu.rot*. In dieser Konfiguration konnten nur die DTI der Serie M16–H8 mit ausreichend hohen Montagevorspannkkräften überzeugen.

Alle Prüfkörper wurden dennoch mit der erzielten Montagevorspannkraft den weiteren Schritten bis zum Bauteil-Zugversuch unterzogen, da ein solches ungünstiges Verhalten auch unter baupraktischen Bedingungen nicht ausgeschlossen werden kann. Eine vergleichende Bewertung der erzielten Montagevorspannkkräfte aus den Anzieh- und Zugversuchen folgt in Kapitel 4.6.

#### Vorspannkraftverluste durch Setzen

Der mittlere relative Vorspannkraftverlust, ausschließlich bedingt durch den direkten Kraftanzeiger, wurde in den vorliegenden Untersuchungen für ein Alter der vorgespannten Verbindung von einer Minute zu 4 % bestimmt. Aufgrund der Untersuchung von Verbindungen mit denselben Komponenten und identischer Anzahl von Kontaktfugen konnte der Einfluss des DTI herausgestellt werden. Die logarithmische Extrapolation der Überwachungsergebnisse von mindestens zwölf Stunden ermöglicht die Abschätzung von Vorspannkraftverlusten für wesentlich größere Zeiträume. Für den theoretischen Fall einer unbeanspruchten vorgespannten Verbindung beträgt der extrapolierte mittlere relative Vorspannkraftverlust im Alter von 50 Jahren etwa 9 %.

Da der Vorspannkraftverlust durch das Setzen und Kriechen der Überstände des direkten Kraftanzeigers nicht aus der Ermittlung eines Setzbetrags sondern aus der Messung der Vorspannkraft resultiert, sind die Ergebnisse nur auf vergleichbare Verhältnisse übertragbar. Außerordentliche Abweichungen, z. B. wesentlich geringere Klemmlängen oder andersartige DTI, können zu abweichenden Vorspannkraftverlusten führen.

#### Auswirkungen von Schraubenzusatzkräften

Die Vergrößerung der Schraubenkraft um eine Schraubenzusatzkraft infolge einer äußeren Zugbeanspruchung, ausgehend vom Niveau der Vorspannkraft, ist un-

umgänglich. Die Höhe der Schraubenzusatzkraft hängt von der Gestaltung der vorgespannten Verbindung mit all ihren Komponenten ab. Ohne Vorspannkraftverluste durch Setzen nach der Montage liegt die Schraubenkraft einschließlich der Schraubenzusatzkraft unter Zugbeanspruchung über der Montagevorspannkraft. Und auch mit Setzkraftverlusten kann die Montagevorspannkraft bei weiterhin überdrückter Trennfuge übertroffen werden, bei klaffender Trennfuge sowieso.

Die einwirkende Axialkraft  $F_A$  wurde bis zum Bemessungswert der Zugtragfähigkeit  $F_{t,Rd}$  gesteigert. Damit übersteigt die Axialkraft die Mindestvorspannkraft ( $F_A = F_{t,Rd} = 1,03 F_{p,C}$ ). Im Rahmen von EN 1993-1-8 ist dies zulässig, siehe Gleichung (3.2).

Die Prüfungen zeigen die Wirkung der Höhe der maximalen Schraubenkraft  $F_{S,max}$  unter Axialkraft im Bezug zur Montagevorspannkraft  $F_M$  in Form von Vorspannkraftverlusten, siehe Bild 4.54. Je weiter die Schraubenkraft, d.h. die Summe von Vorspannkraft und Schraubenzusatzkraft, die vormals eingebrachte Montagevorspannkraft übersteigt, umso größer sind die festgestellten Vorspannkraftverluste. Bei Ausnutzung der maximal zulässigen Zugbeanspruchung  $F_{t,Rd}$  entstanden diese „Überlasten“ vor allem durch nicht ausreichend große Vorspannkräfte, insbesondere unterhalb der Mindestvorspannkraft.

Geringe Vorspannkraftverluste wurden in Verbindungen mit DTI bei Schraubenkräften unterhalb der Montagevorspannkraft und bei überdrückter Trennfuge festgestellt, z.B. ein Verlust von 8,1 % für Prüfung Z11. Die wechselnde Beanspruchung scheint diese Art von Vorspannkraftverlusten zu begünstigen. In diesen Fällen lag die Montagevorspannkraft mindestens 5 % über der Mindestvorspannkraft (Z11), siehe Tabelle C.102.

Mit Verringerung der Montagevorspannkraft auf das Niveau der Mindestvorspannkraft  $F_{p,C}$  kam es mit dem Überschreiten der Montagevorspannkraft um 2,2 % und gleichzeitigem Klaffen der Trennfuge zu einem Verlust von 25,1 % (Z06). Für Montagevorspannkräfte unterhalb der Mindestvorspannkraft und dementsprechend ansteigenden „Überlasten“ wurden Vorspannkraftverluste ab etwa 30 % (Z03) und deutlich darüber festgestellt, siehe Tabellen C.102 bis C.104.

In Verbindungen mit DTI zeigte auch die Wiederholung von identischen Lastwechseln bei klaffender Trennfuge anwachsende Vorspannkraftverluste. Solche Verluste wurden für Verbindungen ohne DTI auch bei klaffender Trennfuge nicht festgestellt.

### **Last-Verformung-Verhalten**

Das Last-Verformung-Verhalten des DTI wurde im Anziehvorgang und unter Zugbeanspruchung durch Anwendung einer Palette von Fühllehren erfasst. Damit ist es dem Vergleich mit der Spalt-Druckkraft-Kurve aus dem Drucklastversuch zugänglich.

Der ermittelte Verlauf der Spalt-Kraft-Kurven zeigt an der Schnittstelle von Anziehvorgang zu Zugbeanspruchung keine signifikante Änderung des Gradienten, obwohl die Einflüsse aus dem Drehen der Mutter unter Zugbeanspruchung entfallen. Die Kurven aus den Anzieh- und Zugversuchen verlaufen im erfassten Bereich des Abplattvorgangs weitestgehend parallel zu den Kurven aus den Drucklastversuchen, allerdings auf einem wesentlich geringeren Kraftniveau bei identischem Spalt. Daher ist davon auszugehen, dass die entscheidenden Vorgänge, die zum Divergieren der Kurven führen, im nicht erfassten Anfangsbereich der Belastung des DTI zu finden sind.

In Übereinstimmung mit den Anziehversuchen wurde zudem festgestellt, dass die Streuungen unterschiedlicher Versuche innerhalb einer Serie und Montagekonfiguration beim Anziehen einer Garnitur wesentlich größer als in Drucklastversuchen an einzelnen DTI sind.

Die Anzeigerdrucklast aus dem Drucklastversuch muss in der Regel signifikant über der Mindestvorspannkraft liegen, damit auch im Anziehvorgang bzw. Anziehversuch der Nachweis einer ausreichend großen Vorspannkraft unter Anwendung des gebotenen Fühllehren-Kriteriums nach EN 14399-9 gelingt.

Das vollständige Abplatten der Überstände wurde teilweise unter Zugbeanspruchung wie auch in den Anziehversuchen erreicht. Die dazu erforderliche Kraft liegt auf ähnlichem Niveau wie das Abknicken der Spalt-Druckkraft-Kurven aus den Drucklastversuchen, in einigen Fällen auch darunter. Der Drucklastversuch liefert daher eine konservative Abschätzung gegenüber dem Ausmessen mit Fühllehren beim Anziehen, um die erforderliche Kraft zu bestimmen, die zu einem vollständigen Abplatten der Überstände erforderlich ist.

Das Last-Verformung-Verhalten der Anzieh- und Zugversuche liefert hingegen keinen Nachweis, dass unter den Bedingungen des Anziehens die erforderliche Kraft zum vollständigen Abplatten der Überstände so gering ist, dass eine plastische Verformung oder der Bruch der Schraubengarnitur ausgeschlossen werden kann.

## 4.6 Vergleichbarkeit der Versuchsarten

### Montagevorspannkkräfte mit Fühllehren-Kriterium

Unter Anwendung des Fühllehren-Kriteriums wurden die erzielten Montagevorspannkkräfte getrennt für die Anziehversuche und die Anziehvorgänge der Bauteil-Zugversuche bewertet. Die festgestellte Montagevorspannkraft ist für die Anziehversuche ein Zwischenergebnis im fortgesetzten Anziehvorgang. Für die Bauteil-Zugversuche wurde der Anziehvorgang hingegen bei Erfüllung des Fühllehren-Kriteriums oder dem Erreichen der Mindestvorspannkraft beendet.

Die Ergebnisse aus den Tabellen 4.9 und 4.11 (Anziehversuche) sowie 4.17 und 4.18 (Zugversuche) sind serienweise tabellarisch in Anhang C.6 zusammengefügt. Es lassen sich so mögliche Einflüsse der besonderen Bedingungen bzw. Abweichungen bei der Versuchsdurchführung der Bauteil-Zugversuche entsprechend Tabelle 4.16 gegenüber den Anziehversuchen erkennen. Für die Serien M16–H8 und M16–H10–A10, für die sowohl Ergebnisse der Anziehversuche als auch der Zugversuche vorliegen, lassen sich anhand der systematischen Bewertung keine Abweichungen identifizieren, siehe Tabellen C.105 und C.106.

Die Serie M20–H8 unterliegt für die beiden Versuchsarten bei jeweils gleicher Montagekonfiguration unterschiedlichen Bewertungen. In Tabelle 4.21 sind diese in Ergänzung zu Anhang C.6 zusammengestellt. Offensichtlich führten die Versuchsbedingungen beim Anziehvorgang der Vorspannkörper zu schlechteren Bewertungen im Gegensatz zu den Anziehversuchen. Die Ursachensuche wird mit Blick auf das Last-Verformung-Verhalten fortgesetzt.

### Last-Verformung-Verhalten des DTI im Anziehvorgang

Die Spalt-Kraft-Kurven der Serie M20–H8 sind in den Bildern 4.59 und 4.60 für die Anziehversuche und Anziehvorgänge der Zugversuche dargestellt. Es ist sowohl für die Montagekonfiguration *Shr.fix* (Bild 4.59) als auch für die Konfiguration *Mu.rot* (Bild 4.60) ersichtlich, dass die gemessene Schraubenkraft bei identischem Spalt bei den Anziehvorgängen der Zugversuche tendenziell geringer ist.

Da die Spalt-Kraft-Kurven der Anziehversuche in der Konfiguration *Shr.fix* bei einem Spalt von 0,4 mm äußerst knapp die Mindestvorspannkraft erreicht bzw. überschritten haben, ist auch eine wenig geringere Kraft der Zugversuche dafür ausreichend, gegenläufige Bewertungen mit „n.i.O.“ zu verursachen. Für die Konfiguration *Mu.rot* ist ebenso das absolute und relative Niveau der Kräfte bei einem



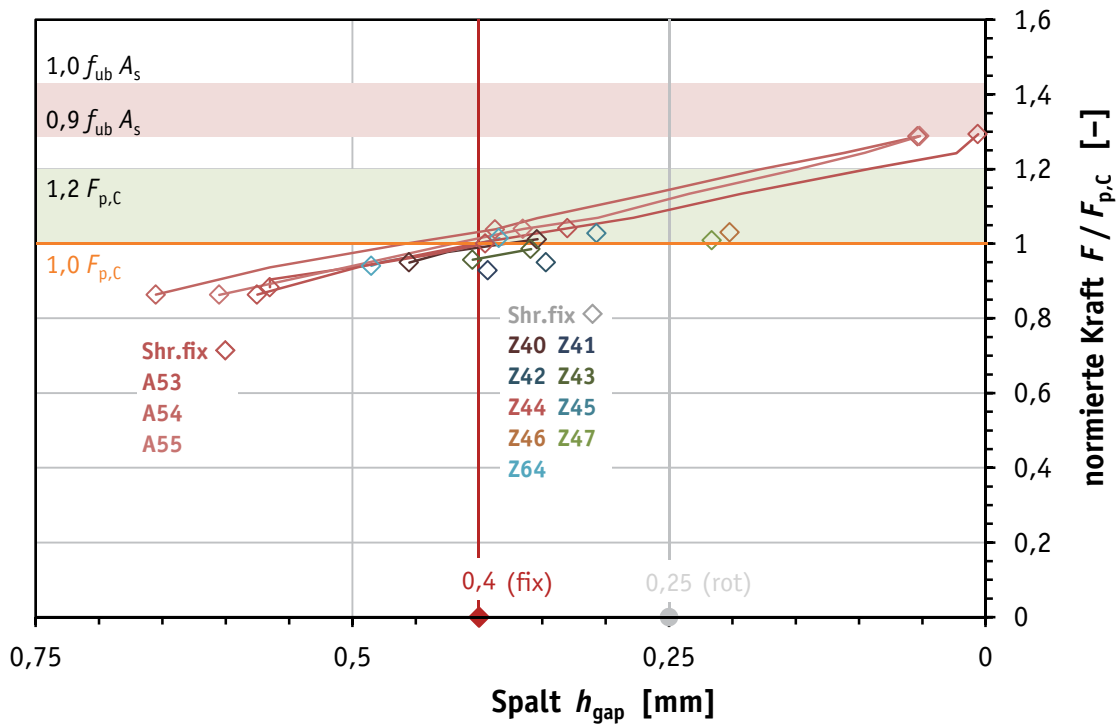
Spalt von 0,25 mm dafür ausreichend, für die Versuchsarten gegenläufige Bewertungen zu formulieren.

Für die übrigen Versuchsserien, für die entsprechende Vergleiche der Versuchsarten möglich sind, sind die Spalt-Kraft-Kurven in Anhang C.7 zusammengestellt. Auch hier sind tendenzielle Unterschiede sichtbar, die allerdings aufgrund der individuellen absoluten und relativen Niveaus der gemessenen Schraubenkräfte nicht zu gegenläufigen Bewertungen führen, siehe Anhang C.6.

**Tabelle 4.21.** Montagevorspannkräfte bei Erreichen des Fühllehren-Kriteriums, Serie M20 – H8, Zusammenfassung von Anziehversuchen und Bauteil-Zugversuchen

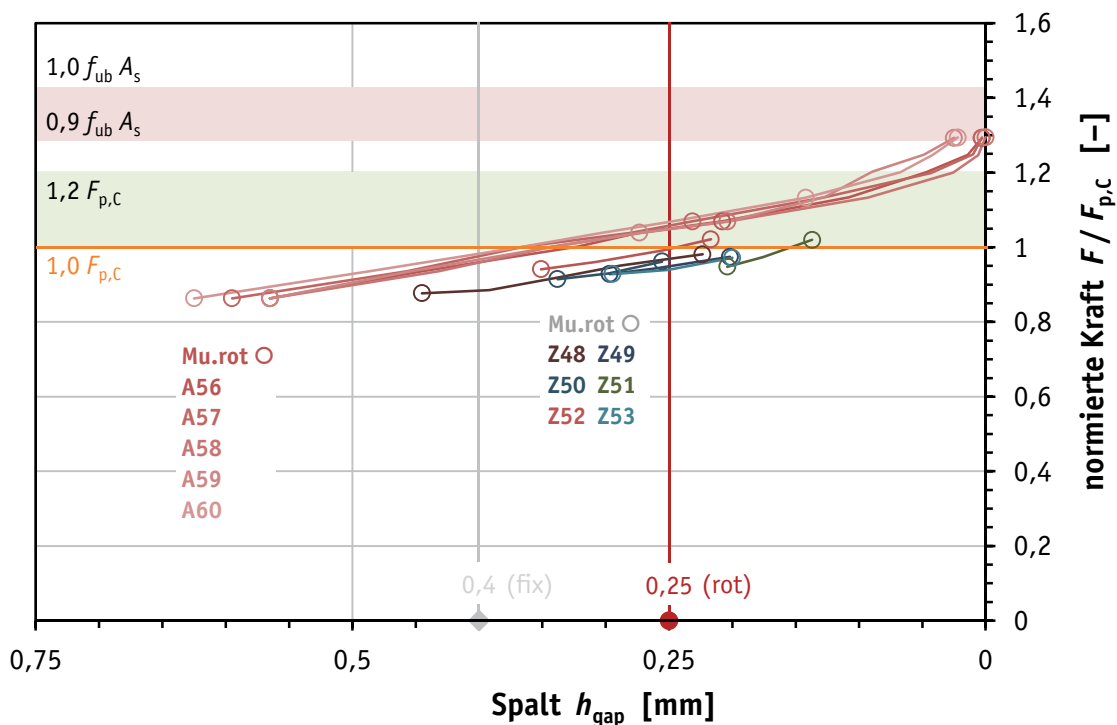
**Table 4.21.** Assembly preloads upon reaching the feeler gauge criterion, M20 – H8 series, summary of tightening tests and component tensile tests

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Prüfung Nr.	DTI Nr.	Montage-konfiguration	erf. Fühllehre [mm]	Schmierung (A) Montagekrit. (Z)	Anziehschritt zu $F_s$	$F_s$ [kN]	$F_s / F_{ub}$ [-]	$F_s / F_{p,c}$ [-]	$F_s / F_{p,c} - 1$ [-]	$\eta_{\text{refusal}}$ [-]	$\eta_{\text{gap}}$ [-]	$\eta_{\text{refusal}} / \eta_{\text{gap}}$	$h_{\text{gap,m}}$ [mm]	$R / 2$ [mm]	$h_{\text{gap,m}}$	$h_{\text{gap,inf}}$	Bewertung
<b>M20 – H8 – AND-A2</b>																	
A53	6	Shr.fix	0,4	K1	4	142,9	0,73	1,04		4	5		0,33 ±0,1				i.O.
A54	7	Shr.fix	0,4	K1	4	142,5	0,73	1,04		3	5		0,39 ±0,07				i.O.
A55	8	Shr.fix	0,4	K1	4	142,6	0,73	1,04		3	5		0,37 ±0,09				i.O.
Z40	9	Shr.fix	0,4	0,4	3	138,8	0,71	1,01		5	5		0,35 ±0,05				n.i.O.
Z64	10	Shr.fix	0,4	0,4	4	139,3	0,71	1,01		3	5		0,38 ±0,1				n.i.O.
Z41	11	Shr.fix	0,4	0,4	1	127,4	0,65	0,93		3	5		0,39 ±0,13				n.i.O.
Z42	12	Shr.fix	0,4	0,4	1	130,3	0,66	0,95		4	5		0,35 ±0,1				n.i.O.
Z43	13	Shr.fix	0,4	0,4	2	135,2	0,69	0,99		5	5		0,36 ±0,04				n.i.O.
Z44	17	Shr.fix	0,4	0,4	5	137,3	0,7	1,0		3	5		0,4 ±0,05				n.i.O.
Z45	14	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	141,0	0,72	1,03		5	5		0,31 ±0,05				k.A.
Z46	15	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	141,4	0,72	1,03		5	5		0,2 ±0,05				k.A.
Z47	16	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	138,5	0,71	1,01		5	5		0,22 ±0,04				n.i.O.
A56	19	Mu.rot	0,25	K1	5	146,7	0,75	1,07		3	5		0,21 ±0,14				i.O.
A57	20	Mu.rot	0,25	K1	5	146,7	0,75	1,07		3	5		0,23 ±0,1				i.O.
A58	21	Mu.rot	0,25	K1	5	146,6	0,75	1,07		3	5		0,2 ±0,1				i.O.
A59	22	Mu.rot	0,25	K1	4	142,6	0,73	1,04		3	5		0,27 ±0,16				i.O.
A60	23	Mu.rot	0,25	K1	6	155,4	0,79	1,13		4	5		0,14 ±0,14				i.O.
Z48	18	Mu.rot	0,25	0,25	5	134,6	0,69	0,98		3	5		0,22 ±0,16				n.i.O.
Z49	24	Mu.rot	0,25	0,25	3	133,6	0,68	0,97		3	5		0,2 ±0,2				n.i.O.
Z50	25	Mu.rot	0,25	0,25	3	132,0	0,67	0,96		3	5		0,26 ±0,17				n.i.O.
Z51	26	Mu.rot	0,25	0,25	3	139,9	0,71	1,02		4	5		0,14 ±0,14				i.O.
Z52	27	Mu.rot	0,25	0,25	4	140,1	0,72	1,02		3	5		0,22 ±0,2				i.O.
Z53	28	Mu.rot	0,25	0,25	3	133,3	0,68	0,97		3	5		0,2 ±0,23				n.i.O.



**Bild 4.59.** Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M20-H8-AND-A2 – Shr.fix (Zv und Av)

**Figure 4.59.** Gap-load-diagram for M20-H8-AND-A2 – Shr.fix series (Zv and Av)



**Bild 4.60.** Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M20-H8-AND-A2 – Mu.rot (Zv und Av)

**Figure 4.60.** Gap-load-diagram for M20-H8-AND-A2 – Mu.rot series (Zv and Av)

Die Anziehvorgänge beider Versuchsarten wurden jeweils in horizontaler Lage, mit demselben Anziehwerkzeug und identischer Anziehgeschwindigkeit, gleichen Komponenten der Schraubengarnitur und überwiegend gleicher Schmierung ausgeführt. Die Methode zur Messung der Schraubenkraft unterscheidet sich allerdings prinzipiell.

### **Messung der Schraubenkraft**

Für die Anziehversuche wurde die Messung der Schraubenkraft durch den Vorspannkraft-Sensor des Anziehprüfstandes übernommen, vgl. Kapitel 4.4.2. Diese Art von Kraftaufnehmer mit mehreren intern angeordneten Dehnungsmessstreifen ist für die möglichen anwendungsspezifischen Exzentrizitäten einer normalen Lasteinleitung unempfindlich. Die Messung der Schraubenkraft für die Bauteil-Zugversuche erfolgte mit einem im Schaft der Schraube implantierten Dehnungsmessstreifen, vgl. Kapitel 4.5.2. Dementsprechend werden die verwendeten Schrauben als Prüfschrauben bezeichnet. Die Verwendung eines einzelnen DMS erscheint gegenüber der Brückenschaltung mehrerer DMS grundsätzlich anfälliger gegenüber Störeinflüssen.

Die Kalibrierung der Prüfschrauben und deren Anwendung im Bauteil-Zugversuch erfolgten auf derselben Zug-Druck-Prüfmaschine. Allerdings wurden die Schraubengarnituren mit entsprechenden Scheiben und ohne DTI in einer Probenaufnahme für Zugversuche zur Kalibrierung belastet. Zweckentsprechend sind Unterschiede zur verwendeten Aufnahmevorrichtung für Bauteil-Zugversuche vorhanden. Die axial zentrische Lasteinleitung der Zugkraft in die Aufnahmevorrichtungen ist jedoch für beide Varianten sichergestellt.

Das Anziehen der Garnitur zum Vorspannen der Bauteile beansprucht auch mit Schmierung der Komponenten die Schraube durch zusätzliche Torsionsschubspannungen, die bei der Kalibrierung unter reiner Zugbeanspruchung nicht vorhanden sind. Eine Beeinflussung des axial zentrischen DMS ist aufgrund der Lage und der Dehnungsrichtung zwar sehr unwahrscheinlich, die Beanspruchung wirkt jedoch auch auf den Verguss-Klebstoff, der in ungünstigen Fällen Schaden nehmen könnte. Dazu ist es in den Prüfungen offensichtlich nicht gekommen, da bei vollständiger Demontage der Prüfschrauben die gemessene Schraubenkraft zuverlässig nahezu null erreichte. Die Einwirkung des Torsionsmomentes ist ebenso für den Vorspannkraft-Sensor vorhanden. Einflüsse sollen allerdings durch die Bauart minimiert werden. Zwischen den beiden Messmethoden sind Einflüsse und Wirkungen allerdings nicht unmittelbar vergleichbar.

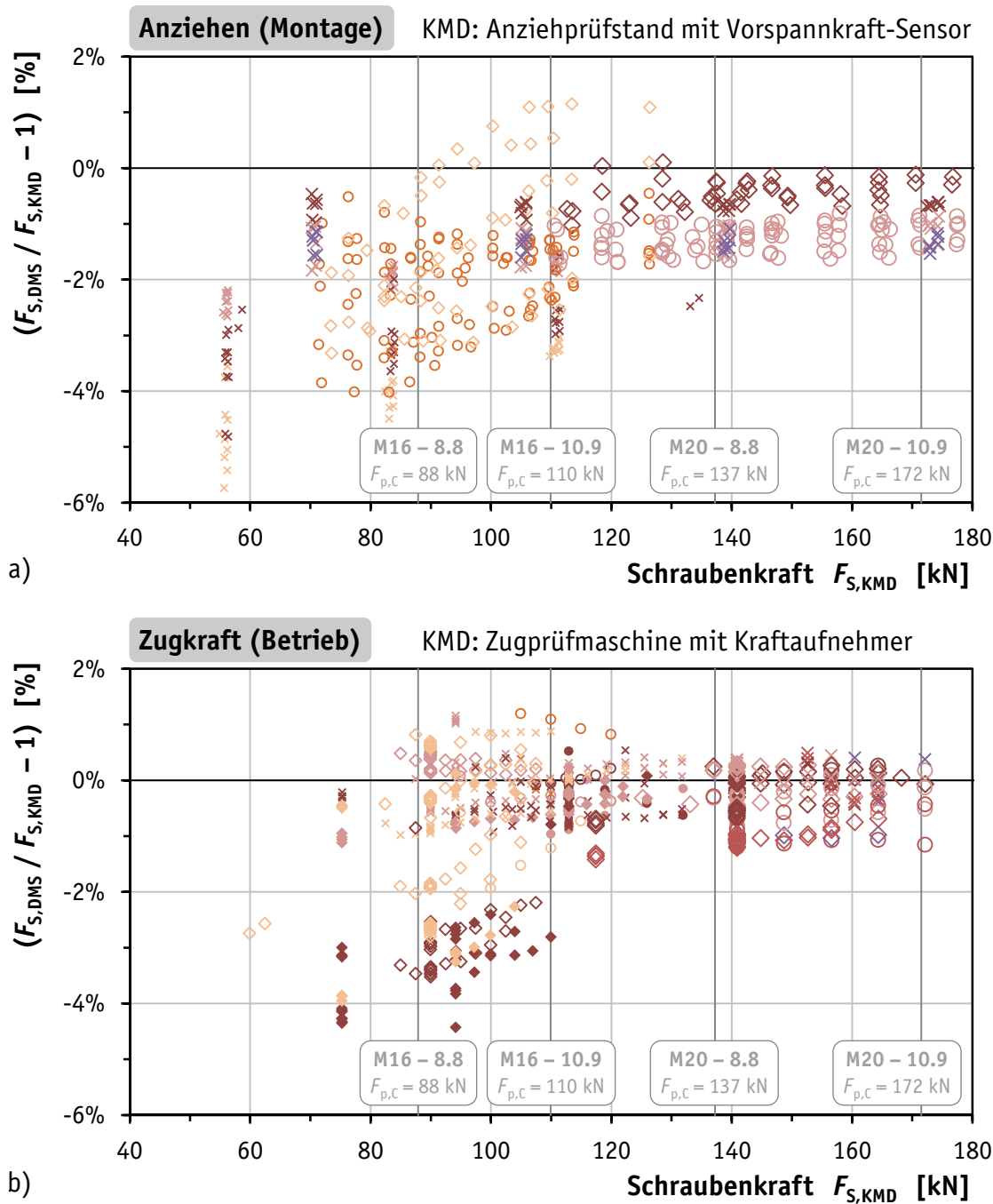
Um mögliche Abweichungen zwischen den beiden Messmethoden qualitativ und quantitativ feststellen zu können, wurden Anziehversuche zugleich mit dem Vorspannkraft-Sensor und einer Prüfschraube durchgeführt. Im Rahmen des Versuchsprogramms wurden die Prüfungen der Serien H8 mit DTI genutzt. Zusätzliche Versuche erfolgten zum Anziehen ohne DTI. Es wurden dazu diejenigen Prüfschrauben verwendet, die auch in den Zugversuchen zum Einsatz kamen.

In Bild 4.61 (a) sind die Ergebnisse der zeitgleichen Messung mit beiden Methoden dargestellt. Das Messergebnis der Prüfschrauben (DMS), die Schraubenkraft  $F_{S,DMS}$ , wird dazu in Relation zur gemessenen Schraubenkraft  $F_{S,KMD}$  des Vorspannkraft-Sensors (KMD) gesetzt und als relative Abweichung  $(F_{S,DMS}/F_{S,KMD} - 1)$  angegeben. Negative Werte bedeuten eine Unterschreitung durch die Prüfschraube ( $F_{S,DMS} < F_{S,KMD}$ ). Folgende Befunde sind ersichtlich:

- größere Abweichungen und eine größere Streuung der Abweichungen der Prüfschrauben M16 (bis  $-5\%$ ) gegenüber den Prüfschrauben M20 (bis  $-2\%$ ),
- geringere Abweichungen der Prüfschrauben M20 in der Montagekonfiguration *Shr.fix* (bis  $-1\%$ ) gegenüber den Konfigurationen *Mu.rot* und ohne DTI (bis  $-2\%$ ),
- keine außerordentlichen regelmäßigen Abweichungen einer einzelnen Prüfschraube.

Die größere Steifigkeit der Schrauben M20 scheint die Abweichungen der Messergebnisse zu verringern, ebenso wie ein direkter Kraftanzeiger unter dem Schraubenkopf, der durch ungleichmäßiges Abplatten eine gleichmäßige Lasteinleitung gewährleistet.

Trotz der festgestellten Abweichungen von bis zu  $5\%$  ist das Ergebnis durchaus positiv zu bewerten. Die Verwendung der Prüfschrauben liefert auch unter den Anwendungsbedingungen des Anziehens zufriedenstellende Ergebnisse für die Schraubenkraft. Die Prüfschrauben können und sollen allerdings nicht die vorgeschriebenen bzw. verfügbaren Messmethoden mit komplexeren Kraftaufnehmern ersetzen, denn ihre Anwendung wurde nur unter den Voraussetzungen erforderlich, dass die Steifigkeit des Klemmpakets der vorgespannten Verbindung nicht verändert werden soll und eine äußere Zugkraft eingeleitet werden muss.



Konfiguration	Durchmesser		Festigkeits- klasse		Prüfschraube Nr.	
	M16	M20	H8	H10	M16	M20
ohne DTI	×	×			Shr061 – M16×90	Shr002 – M20×80
mit DTI	Shr.fix	◇	◇	◇	Shr062 – M16×90	Shr001 – M20×110
	Mu.rot	○	○	○	Shr008 – M16×100	Shr002 – M20×110
					Shr018 – M16×100	Shr005 – M20×110

**Bild 4.61.** Relative Messabweichung zwischen einzelnen Messwerten der Prüfschrauben (DMS) und dem Kraftaufnehmer (KMD) der jeweiligen Prüfmaschine

**Figure 4.61.** Relative error of single measurements of the instrumented measuring bolts (DMS) and the load cell (KMD) of the respective testing machine

Die Bauteil-Zugversuche ermöglichen ebenso wie die Anziehversuche einen Vergleich zwischen zwei Messmethoden. Es stehen zum einen das Messergebnis der Prüfschrauben und zum anderen die aufgezeichnete Zugkraft der Zug-Druck-Prüfmaschine, die mit einem Kraftaufnehmer ausgestattet ist, zur Verfügung. Solange die vorgespannten Bauteile im Zugversuch in der Trennfuge nicht klaffen, besteht die Schraubenkraft aus der Vorspannkraft zuzüglich der Schraubenzusatzkraft und liegt über der eingeleiteten äußeren Zugkraft. Mit dem Klaffen der Trennfuge besteht Gleichgewicht zwischen der äußeren Zugkraft und der Schraubenkraft. Der Vergleich der Messmethoden ist nun möglich.

Bild 4.61 (b) zeigt die Abweichungen zwischen der Messung der Schraubenkraft mit der Prüfschraube (DMS) und dem Kraftaufnehmer (KMD) der Prüfmaschine. Grundsätzlich gibt es unter diesen Bedingungen zahlenmäßig mehr Abweichungen in den positiven Bereich, in dem das Messergebnis der Prüfschraube das entsprechende des Kraftaufnehmers übersteigt. Dies erscheint plausibel, da die Kalibrierung der Prüfschrauben mit eben diesem Kraftaufnehmer vorgenommen wurde. Somit sollten systematische Messabweichungen, wie sie zwischen zwei unterschiedlichen Messsystemen und -methoden vorkommen können, von geringerer Bedeutung sein. Das beidseitig ausgeprägte Streuband der Abweichungen kennzeichnet vielmehr zufällige Einflüsse auf die Messergebnisse.

Solche zufälligen Einflüsse können aus einer Biegebeanspruchung der Schraube infolge von Exzentrizitäten der Lasteinleitung in den Vorspannkörper und in die Schraubengarnitur bestehen. Die geringere Biegesteifigkeit des Schaftes der Schrauben M16 könnte bei ansonsten gleichartigen geometrischen Verhältnissen die größeren Abweichungen begünstigen.

Insgesamt sind die Abweichungen auch innerhalb der Zugversuche in akzeptabler Größenordnung. Die einzelnen Messwerte der Zugversuche sind in den Tabellen in Anhang C.3 enthalten.

## **5 Modellbildung mit direkten Kraftanzeigern**

### **5.1 Allgemeines**

Die Bauteil-Zugversuche an Verbindungen mit direkten Kraftanzeigern haben gezeigt, dass trotz der Ausführung des Anziehvorgangs entsprechend EN 1090-2 und EN 14399-9 signifikante Vorspannkraftverluste unter äußerer Zugbeanspruchung auftreten können. Erfolgt die Montage normkonform unter Erhalt eines Restspaltes, so sind die Überstände des DTI permanent an der geometrisch werkstofflichen Grenzflächenpressung beansprucht. Eine Überschreitung dieser Grenzflächenpressung, die durch Schraubenzusatzkräfte aus äußerer Beanspruchung verursacht werden kann, führt zu weiterer plastischer Verformung der Überstände und somit zu Vorspannkraftverlusten.

Die Kräfte und Verformungen innerhalb der Schraubenverbindung lassen sich für die Montage und den Betriebszustand anschaulich und einfach mit Hilfe des Verspannungsschaubildes darstellen. Unter Berücksichtigung des Kraft-Verformung-Verhaltens des DTI – abgeleitet aus den Drucklastversuchen – werden die bekannten und praxiserprobten mechanischen Zusammenhänge des Verspannungsschaubildes entsprechend VDI 2230-1 für die Anwendung mit direkten Kraftanzeigern erweitert. Eine Abschätzung möglicher Vorspannkraftverluste kann mit diesem Modell für unterschiedliche Abmessungsbereiche und Beanspruchungsniveaus vorgenommen werden.

### **5.2 Nachgiebigkeiten der Komponenten**

#### **5.2.1 Allgemeines**

Die Komponenten der Schraubenverbindung sind im Allgemeinen Schraube und Mutter sowie die geklemmten Platten bzw. Bauteile. Im Stahlbau ist der Einsatz von zusätzlichen Scheiben bei hochfesten vorgespannten Verbindungen zudem obligatorisch [SS11]. Ausnahmen bestehen allenfalls für die Festigkeitsklasse 8.8. Das Interagieren der Komponenten erfolgt durch die Einheit von Schraube und Mutter auf der einen sowie der Bauteile auf der anderen Seite. Die Scheiben, und entsprechend auch ein direkter Kraftanzeiger, sind in unterschiedlicher Weise zu berücksichtigen.

Im Anziehvorgang erfolgt die Lasteinleitung an den Auflageflächen der Schraubengarnitur durch das Vorspannen. Die Scheiben bilden zusammen mit den Bauteilen den vorgespannten Körper. Das Gleichgewicht der Kräfte in Schraubengarnitur und Bauteilen mit Scheiben sorgt aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeiten bzw. Nachgiebigkeiten für unterschiedlich große Verformungen, siehe Bild 2.3.

Im Betriebszustand erfolgt die Einleitung der äußeren Beanspruchung über die Bauteile dies- und jenseits der Trennfuge. Bevor die zu übertragende Zugkraft in die Schraube gelangt, sind vom Ort der Lasteinleitung aus Bereiche des Bauteils sowie die Scheibe unter Druckbeanspruchung zu durchfließen. Die Kraftumlenkung in Schraubenkopf und Mutter sorgt für die Umwandlung der Druck- in eine Zugkraft. Am Ort der Lasteinleitung herrscht Gleichgewicht der Verformungen zwischen dem Rückfedern der Bereiche der Bauteile zwischen Trennfuge und Lasteinleitungsort und dem weiteren Verkürzen des restlichen Bauteilquerschnitts einschließlich der Scheiben und der Verlängerung der Schraube, siehe Bild 2.4. Dieses Gleichgewicht der Verformung besteht allerdings nur bis zum Klaffen der Trennfuge.

Der Ort der Lasteinleitung ist im realen Bauteil keine definierte Ebene, sondern ein räumlich beanspruchter Bereich des Bauteils. Für die Modellbildung handelt es sich bei der Festlegung des Ortes der Lasteinleitung zumeist um eine Abschätzung vor allem anhand der Auswirkungen auf die Kräfte und Verformungen mit Hilfe des Krafteinleitungsfaktors  $n$ . Um zum einen die höchste Schraubenbeanspruchung und zum anderen die niedrigste Restklemmkraft zu ermitteln, werden zwei Annahmen für den Krafteinleitungsfaktor empfohlen [KTW07]. Die Bestimmung des Krafteinleitungsfaktors erfolgt im Anschluss an die Ermittlung der Nachgiebigkeiten.

Die Nachgiebigkeit  $\delta$  eines Elements ergibt sich aus einer einwirkenden Kraft  $F$  und der zugehörigen richtungsgleichen Verformung  $f$  wie folgt:

$$\delta = \frac{f}{F} \quad (5.1)$$

Mit den bekannten Eigenschaften des Elements – der Länge  $l$ , dem Elastizitätsmodul  $E$  und der Querschnittsfläche  $A$  – lässt sich die Nachgiebigkeit äquivalent bestimmen:

$$\delta = \frac{l}{E \cdot A} \quad (5.2)$$



Somit stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung, die Eigenschaften eines Modells zu definieren: Entweder mit Hilfe eines experimentell ermittelten Last-Verformung-Verhaltens nach Gleichung (5.1) oder mit bekannten bzw. hinreichend genau abgeschätzten Eigenschaften nach Gleichung (5.2). Beide Möglichkeiten kommen im Folgenden zur Anwendung.

### 5.2.2 Sechskantschraube und -mutter

Die Nachgiebigkeit der Schraubengarnitur  $\delta_S$  aus Schraube und Mutter ergibt sich aus der Summe der Nachgiebigkeiten ihrer gleichartigen Teilabschnitte, siehe Bild 5.1 (a). Für die Bereiche der komplexen Kraftumlenkung am Schraubenkopf, im gepaarten Gewinde und in der Mutter stellt VDI 2230-1 empirisch belegte Ersatzigenschaften als Kombination von Länge ( $l$ ) und Querschnittsfläche ( $A$ ) bereit, die für die vorliegende Durchsteckschraubverbindung (DSV) mit Sechskantschraube und -mutter angewendet werden können.

Aus den einzelnen Nachgiebigkeiten des Schraubenkopfs:

$$\delta_{SK} = \frac{l_{SK}}{E \cdot A_N} = \frac{0,5 \cdot d}{E \cdot A_N} \quad (5.3)$$

des Schraubenschaftes:

$$\delta_{Sch} = \frac{l_{Sch}}{E \cdot A_{Sch}} \quad (5.4)$$

des freien, nicht eingeschraubten Gewindes:

$$\delta_{Gew} = \frac{l_{Gew}}{E \cdot A_{d_3}} \quad (5.5)$$

des eingeschraubten Schraubengewindekerns:

$$\delta_G = \frac{l_G}{E \cdot A_{d_3}} = \frac{0,5 \cdot d}{E \cdot A_{d_3}} \quad (5.6)$$

und des Muttergewindebereichs:

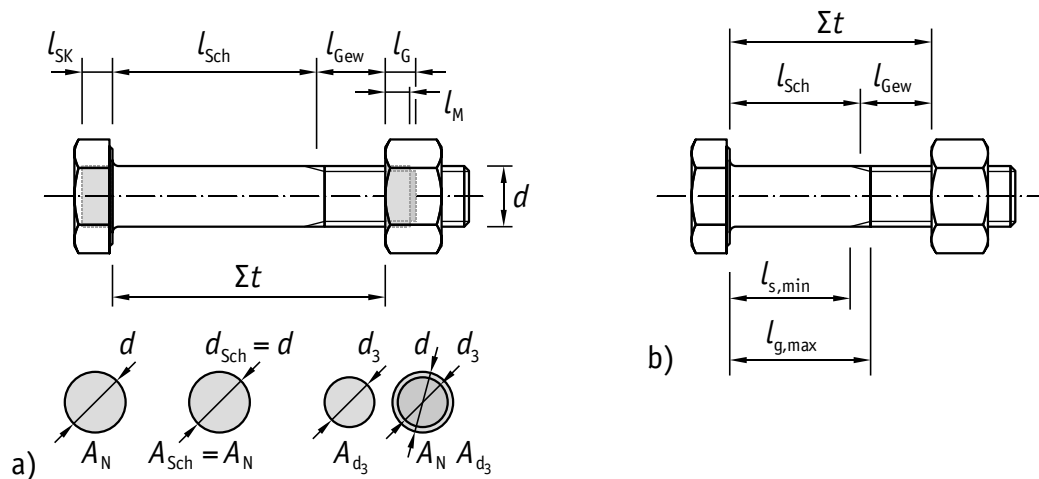
$$\delta_M = \frac{l_M}{E \cdot A_N} = \frac{0,4 \cdot d}{E \cdot A_N} \quad (5.7)$$

ergibt sich die Nachgiebigkeit der Schraubengarnitur zu:

$$\delta_S = \delta_{SK} + \delta_{Sch} + \delta_{Gew} + (\delta_G + \delta_M) \quad (5.8)$$

Der Elastizitätsmodul  $E$  ist für die Komponenten der stahlbautypischen Schraubengarnitur in guter Näherung identisch. Eine Differenzierung der Elastizitäts-

module ist insbesondere für Einschraubverbindungen mit unterschiedlichen metallischen Werkstoffen in den allgemeinen Formulierungen der VDI 2230-1 vorgesehen, hier allerdings nicht erforderlich. Der Elastizitätsmodul  $E_s$  wird entsprechend der Festlegung in EN 1993-1-1 für sämtliche Komponenten der Garnitur mit  $210.000 \text{ N/mm}^2$  angesetzt.



**Bild 5.1.** Verformungsbereiche und zugeordnete Querschnitte von Schraube und Mutter zur Bestimmung der elastischen Nachgiebigkeit

**Figure 5.1.** Deformation regions and assigned cross-sections of bolt and nut for the determination of the elastic resilience

Die zugehörigen Querschnittsflächen sind der Nennquerschnitt:

$$A_N = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad (5.9)$$

der Schaftquerschnitt:

$$A_{Sch} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{Sch}^2 \quad (5.10)$$

und der Kernquerschnitt des Gewindes:

$$A_{d_3} = \frac{\pi}{4} \cdot d_3^2 \quad (5.11)$$

Sofern es sich nicht um Passschrauben mit einem vergrößerten Schaftdurchmesser handelt, sind für die stahlbautypischen Schrauben der Nenn- und der Schaftquerschnitt identisch, siehe Bild 5.1.

Die Schaftlänge  $l_s$  unterliegt entsprechend den Produktnormen zulässigen Toleranzen, wobei die Mindestlänge definiert ist. Der Abstand  $l_g$  zwischen der Aufla-

gefläche des Schraubenkopfs und dem ersten vollen Gewindegang ist ebenso mit Toleranz versehen. Hier ist der Höchstwert normativ festgelegt. Die Länge des Gewindeauslaufs mit dem Übergang vom Schaft- in den Gewindequerschnitt ergibt sich entsprechend als Differenz der tatsächlich vorliegenden Längen.

Der Gewindeauslauf wird für die Modellbildung nicht als zusätzlicher Abschnitt berücksichtigt, da die Länge in Relation zu den übrigen Abschnitten gering ist. Vereinfacht wird der rechnerische Übergang von Schaft zu Gewinde am Mittelpunkt des tolerierten Gewindeauslaufs angenommen.

Die Länge des Schraubenschaftes:

$$l_{\text{Sch}} = \frac{l_{s,\min} + l_{g,\max}}{2} \quad (5.12)$$

und die Länge des nicht eingeschraubten Gewindes:

$$l_{\text{Gew}} = \Sigma t - \frac{l_{s,\min} + l_{g,\max}}{2} \quad (5.13)$$

können dementsprechend aus der Klemmlänge  $\Sigma t$  der Verbindung und den Angaben der Produktnorm bestimmt werden, siehe Bild 5.1 (b).

Für die in den Bauteil-Zugversuchen verwendeten HV-Schraubengarnituren sind die geometrischen Größen und die elastischen Nachgiebigkeiten in Tabelle D.1 zusammengestellt. Tabelle 5.1 enthält daraus eine Auswahl der elastischen Nachgiebigkeiten.

**Tabelle 5.1.** Elastische Nachgiebigkeiten der Schraubengarnituren (Auswahl)

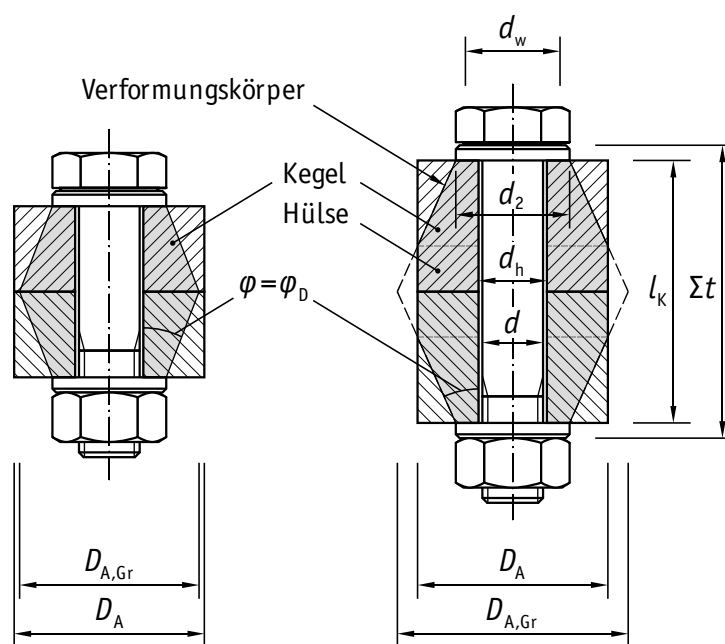
**Table 5.1.** Elastic resilienties of the bolting assemblies (selection)

	$d$	$l_{\text{nom}}$	$l_{s,\min}$	$l_{g,\max}$	$\Sigma t$	$\delta_{\text{SK}}$	$\delta_{\text{Sch}}$	$\delta_{\text{Gew}}$	$\delta_{\text{G}}$	$\delta_{\text{M}}$	$\delta_{\text{S}}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm/kN]	[mm/kN]	[mm/kN]	[mm/kN]	[mm/kN]	[mm/kN]
<b>M16 × 90</b>	16	90	56	62	70	1,895 E-4	1,398 E-3	3,635 E-4	2,644 E-4	1,516 E-4	2,367 E-3
<b>M16 × 100</b>	16	100	66	72	80	1,895 E-4	1,635 E-3	3,635 E-4	2,644 E-4	1,516 E-4	2,604 E-3
<b>M20 × 80</b>	20	80	39,5	47	53	1,517 E-4	6,559 E-4	2,062 E-4	2,115 E-4	1,213 E-4	1,346 E-3
<b>M20 × 110</b>	20	110	69,5	77	83	1,517 E-4	1,111 E-3	2,062 E-4	2,115 E-4	1,213 E-4	1,801 E-3

### 5.2.3 Bauteile

Durch die Axialsymmetrie der Vorspannkörper der Bauteil-Zugversuche ist eine *zentrisch verspannte Einschraubenverbindung* gegeben, vgl. VDI 2230-1. Sie zeichnet sich durch den vom Schraubenkopf ausgehenden Druckkegel aus, der

symmetrisch und vollständig ausgebildet ist. Die Nachgiebigkeit der zentrisch verspannten Vorspannkörper lässt sich nach VDI 2230-1 berechnen, indem näherungsweise zwei Verformungskegel und gegebenenfalls eine Verformungshülse den vorgespannten Körper der Durchsteckschraubverbindung abbilden. Ob eine Verformungshülse zwischen den Verformungskegeln zu berücksichtigen ist, hängt vom Winkel  $\varphi$  des Ersatzverformungskegels, der Gesamtdicke und dem Außendurchmesser der verspannten Bauteile ab. Mit Hilfe des Grenzdurchmessers  $D_{A,gr}$  lässt sich im Vergleich zum Außendurchmesser  $D_A$  des Vorspannkörpers die Fallunterscheidung vornehmen, siehe Bild 5.2.



**Bild 5.2.** Verformungskörper zur Bestimmung der elastischen Nachgiebigkeit der Bauteile gemäß VDI 2230-1

**Figure 5.2.** Deformation body for the determination of the elastic resilience of the components according to VDI 2230-1

Der Grenzdurchmesser beträgt im Allgemeinen:

$$D_{A,gr} = d_w + w \cdot l_K \cdot \tan \varphi \quad (5.14)$$

Da weder der Schraubenkopf noch die Mutter unmittelbar auf dem Bauteil aufliegen, sondern mindestens eine Scheibe dazwischen liegt, ist der Außendurchmesser  $d_w$  der ebenen Auflagefläche von Kopf oder Mutter durch den Außendurchmesser  $d_2$  der stahlbautypischen Scheibe zu ersetzen:

$$d_w = d_2 \quad (5.15)$$

Ferner ist für die Durchsteckschraubverbindung (DSV) der Verbindungskoeffizient  $w$  mit eins anzusetzen. Damit beträgt der Grenzdurchmesser für stahlbaupische Verbindungen unter Berücksichtigung des Winkels  $\varphi_D (= \varphi)$  des Ersatzverformungskegels der DSV:

$$D_{A,gr} = d_2 + l_k \cdot \tan \varphi_D \quad (5.16)$$

Die Gesamtdicke der verspannten Bauteile wird hier mit der Klemmlänge  $l_k$  nach VDI 2230-1 gleichgesetzt, so dass für die Bestimmung der Nachgiebigkeit der Bauteile das Formelzeichen  $l_k$  in den Gleichungen bestehen bleiben kann. Die Klemmlänge als Abstand zwischen den Auflageflächen von Schraubenkopf und Mutter, d.h. die Gesamtdicke der Bauteile zuzüglich der Höhe der Scheiben, wird entsprechend EN 14399 mit  $\Sigma t$  bezeichnet, siehe Bild 5.2.

Mit dem Längenverhältnis

$$\beta_L = \frac{l_k}{d_w} \quad (5.17)$$

und dem Durchmesser Verhältnis

$$y = \frac{D'_A}{d_w} \quad (5.18)$$

ergibt sich der Winkel des Ersatzverformungskegels der DSV gemäß VDI 2230-1 zu:

$$\tan \varphi_D = 0,362 + 0,032 \cdot \ln \left( \frac{\beta_L}{2} \right) + 0,153 \cdot \ln y \quad (5.19)$$

Unter den gegebenen Abmessungsverhältnissen der Vorspannkörper mit Flansch wird der Ersatz-Außendurchmesser  $D'_A$  des Grundkörpers zur Berücksichtigung der Stützwirkung des umgebenden Materials mit dem Außendurchmesser  $D_A$  des Grundkörpers gleichgesetzt. Die Auswirkungen des Unterschieds sind vernachlässigbar.

Die Nachgiebigkeit der Bauteile ergibt sich unter der Voraussetzung  $D_A \geq D_{A,gr}$  mit zwei Verformungskegeln zu:

$$\delta_p = \frac{2}{w \cdot d_h \cdot \tan \varphi_D} \cdot \ln \left[ \frac{(d_w + d_h) \cdot (D_A - d_h)}{(d_w - d_h) \cdot (D_A + d_h)} \right] + \frac{4}{D_A^2 - d_h^2} \cdot \left[ \Sigma t - \frac{(D_A - d_w)}{w \cdot \tan \varphi_D} \right] \quad (5.20)$$

$E_p \cdot \pi$

Unter Berücksichtigung von zwei Verformungskegeln und einer Verformungshülse ergibt sich die Nachgiebigkeit unter der Voraussetzung  $d_w < D_A < D_{A,gr}$  zu:

$$\delta_p = \frac{2 \cdot \ln \left[ \frac{(d_w + d_h) \cdot (d_w + w \cdot l_K \cdot \tan \varphi_D - d_h)}{(d_w - d_h) \cdot (d_w + w \cdot l_K \cdot \tan \varphi_D + d_h)} \right]}{w \cdot E_p \cdot \pi \cdot d_h \cdot \tan \varphi_D} \quad (5.21)$$

Der Elastizitätsmodul  $E_p$  der Bauteile wird ebenfalls mit 210.000 N/mm<sup>2</sup> angesetzt.

Die elastischen Nachgiebigkeiten sowie die zur Berechnung benötigten geometrischen Größen sind für die im Bauteil-Zugversuch verwendeten Vorspannkörper in Tabelle D.2 zusammengestellt. Tabelle 5.2 zeigt die Nachgiebigkeiten für eine Auswahl von Bauteilen.

**Tabelle 5.2.** Elastische Nachgiebigkeiten der Bauteile (Auswahl)

**Table 5.2.** Elastic resiliences of the components (selection)

	$d_h$	$d_w$	$l_K$	$D_A$	$D_{A,Gr}$	$w$	$\tan \varphi_D$	$\beta_L$	$y$	$\varphi_D$	$\delta_p$
		$d_2$		$D'_A$							
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[°]	[mm/kN]
<b>M16 × 90</b>	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>M16 × 100</b>	18	30	69	51	60,9	1	0,448	2,30	1,70	24,1	3,029 E-4
<b>M20 × 80</b>	22	37	46	51	55,2	1	0,396	1,24	1,38	21,6	1,858 E-4
<b>M20 × 110</b>	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4

#### 5.2.4 Flache Scheiben

Flache Scheiben weisen aufgrund ihrer geringen Dicke eine vielfach kleinere elastische Nachgiebigkeit im Vergleich zur Schraubengarnitur und den Bauteilen auf. Um das Verformungsverhalten vollständig zu beschreiben, insbesondere im Wechsel des Lastenleitungspunktes vom Montagevorgang zum Betriebszustand, werden die Nachgiebigkeiten dennoch berücksichtigt.

Die elastische Nachgiebigkeit von flachen Scheiben mit Fase nach EN 14399-6 sowie mutterseitigen und kopfseitigen Scheiben nach EN 14399-9 wird gegebenenfalls unter Vernachlässigung der Fasen wie folgt berechnet:

$$\delta_{Shb} = \frac{h}{E \cdot A_{Shb}} \quad (5.22)$$

mit

$$A_{\text{Shb}} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_2^2 - d_1^2) \quad (5.23)$$

Die elastischen Nachgiebigkeiten der entsprechenden Scheiben werden mit den Nennwerten der Abmessungen aufgrund der engen Toleranzen berechnet und sind in Tabelle 5.3 zusammengestellt.

Darüber hinaus sind in Tabelle 5.3 die Nachgiebigkeiten der scheibenförmigen Grundkörper der direkten Kraftanzeiger enthalten. Die Berechnung für die direkten Kraftanzeiger erfolgt mit den gemittelten tatsächlichen geometrischen Abmessungen entsprechend Tabelle 4.3. Dies ist aufgrund der weitgefassten Grenzmaße nach EN 14399-9 erforderlich.

**Tabelle 5.3.** Elastische Nachgiebigkeiten von flachen Scheiben

**Table 5.3.** Elastic resiliences of plain washers

			$d_1$	$d_2$	$h (h_1)$	$A_{\text{Shb}}$	$\delta_{\text{Shb}} (\delta_{\text{DTI,nom}})$
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm/kN]
<b>M16</b>	Shb H	EN 14399-6	17	30	4	480	$3,969 \cdot 10^{-5}$
	Shb HB	EN 14399-9	17	30	4	480	$3,969 \cdot 10^{-5}$
	Shb HN		16,1	29	4	457	$4,169 \cdot 10^{-5}$
		H8 – AND–A1	16,9	36,5	3,2	820	$1,867 \cdot 10^{-5}$
	DTI	H10 – TS–A10	17,0	36,5	3,2	823	$1,834 \cdot 10^{-5}$
		H10 – TS–A11	16,9	36,3	3,2	808	$1,860 \cdot 10^{-5}$
<b>M20</b>	Shb H	EN 14399-6	21	37	4	729	$2,613 \cdot 10^{-5}$
	Shb HB	EN 14399-9	21	37	4	729	$2,613 \cdot 10^{-5}$
	Shb HN		20,1	36	4	701	$2,719 \cdot 10^{-5}$
		H8 – AND–A2	21,0	40,8	3,8	957	$1,875 \cdot 10^{-5}$
	DTI	H10 – TS–22AA	21,1	44,9	4,0	1237	$1,522 \cdot 10^{-5}$

## 5.2.5 Direkte Kraftanzeiger

### 5.2.5.1 Allgemeines

Die durchgeführten Drucklastversuche entsprechend Kapitel 4.3 zeigen das ausgeprägte plastische Verformungsverhalten der direkten Kraftanzeiger, das durch die Änderung der Querschnittsfläche der verformten Überstände beeinflusst ist. Dadurch ergeben sich zudem in Abhängigkeit vom aufgeprägten Beanspruchungsniveau unterschiedliche Nachgiebigkeiten für die elastische Rückfederung des DTI bei einer Entlastung, vgl. Bild 4.14.

Detaillierte Erkenntnisse über das Last-Verformung-Verhalten von DTI, wie sie mit Hilfe des Drucklastversuchs gewonnen werden können, sind aus der Literatur nicht bekannt. Im Übrigen wären solche Ergebnisse nur mit großer Unsicherheit auf DTI anderer Hersteller übertragbar. Und auch für die Übertragbarkeit auf andere Lose desselben Herstellers bestehen große Unsicherheiten, vgl. Bild 4.18. Dies ist durch die vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich der Geometrie und Werkstofffestigkeit bedingt, die die Produktnormen zulassen.

Im Gegensatz zur Ermittlung der Nachgiebigkeiten von Schraubengarnitur und Bauteilen anhand von bekannten, erprobten und übertragbaren mechanischen Modellen erfolgt die Ermittlung der elastischen und plastischen Nachgiebigkeiten des DTI aus den gewonnenen individuellen experimentellen Ergebnissen.

### 5.2.5.2 Nachgiebigkeit des Versuchsaufbaus

Der Drucklastversuch ist trotz des regulären zweistufigen Prüfablaufs nicht dazu geeignet, den Einfluss der Steifigkeit des Versuchsaufbaus in der Messung der Verformung zu eliminieren. Sofern die Auswirkungen der Nachgiebigkeit des Versuchsaufbaus im Vergleich zu der Nachgiebigkeit des DTI nicht abgeschätzt und vernachlässigt werden können, ist die Ermittlung der Nachgiebigkeit des einzelnen DTI ohne den Einfluss des Versuchsaufbaus vorzunehmen.

Die rechnerische elastische Nachgiebigkeit des scheibenförmigen Grundkörpers des DTI ist entsprechend Tabelle 5.3 bekannt. Sie gilt bei vollständig abgeflachten Überständen. Im experimentellen Druckversuch wird sich diese Nachgiebigkeit in guter Näherung bei der Entlastung in der Verformung-Druckkraft-Kurve einstellen. Bild 5.3 zeigt die Spalt-Druckkraft-Kurve (Kurve 1) des Drucklastversuchs D01, bestehend aus den aufgezeichneten Messwerten des zweiten Schrittes. Der Kurvenverlauf des ersten Schrittes ist hier entbehrlich, da er die Nachgiebigkeit des reduzierten ringförmigen Grundkörpers beinhaltet, die beim Einsatz des DTI keine Bedeutung hat. Ausgehend vom Punkt 2C mit der maximalen Druckkraft im Versuch ist die nominelle Nachgiebigkeit  $\delta_{\text{DTI, nom}}$  des DTI mit abgeflachten Überständen eingezeichnet. Im Vergleich zum linearen Kurvenverlauf der aufgezeichneten Entlastung ist der Unterschied der Gradienten ersichtlich. Der experimentelle Kurvenverlauf beinhaltet die summierten elastischen Nachgiebigkeiten von DTI ( $\delta_{\text{DTI}}$ ) und Versuchsaufbau ( $\delta_{\text{setup}}$ ). Die Differenz der Gradienten beider Kurven entspricht der elastischen Nachgiebigkeit  $\delta_{\text{setup}}$  des Versuchsaufbaus. Diese deutliche und nicht zu vernachlässigende Nachgiebigkeit resultiert aus dem



vorliegenden Versuchsaufbau entsprechend Bild 4.11. Der Wegaufnehmer war an der oberen Seite des oberen Lagerblocks fixiert, wobei die Verformung des oberen Lagerblocks mit dem Wegaufnehmer zusätzlich zur Höhe des Spaltes aufgezeichnet wurde.

Aus den je Serie vorliegenden Ergebnissen der Drucklastversuche erfolgt zunächst die Bestimmung der individuellen Nachgiebigkeit  $\delta_{2CD,i}$  zwischen den Punkten 2C und 2D für jeden einzelnen Versuch. Daraus wird die individuelle elastische Nachgiebigkeit  $\delta_{setup,i}$  des Versuchsaufbaus wie folgt bestimmt:

$$\delta_{setup,i} = \delta_{2CD,i} - \delta_{DTI,nom} \quad (5.24)$$

Der Versuchsaufbau des Drucklastversuchs variiert lediglich mit dem Nenn-durchmesser des DTI, vgl. Kapitel 4.3.2. Die Festigkeitsklasse hat keinen Einfluss auf die Konfiguration des Druckbelastungssystems. Daher wird die elastische Nachgiebigkeit des Versuchsaufbaus als Mittelwert der individuellen Nachgiebigkeiten je Nenndurchmesser bestimmt. In Tabelle 5.4 sind die individuellen Werte sowie die Mittelwerte für die Nenndurchmesser M16 und M20 zusammengestellt.

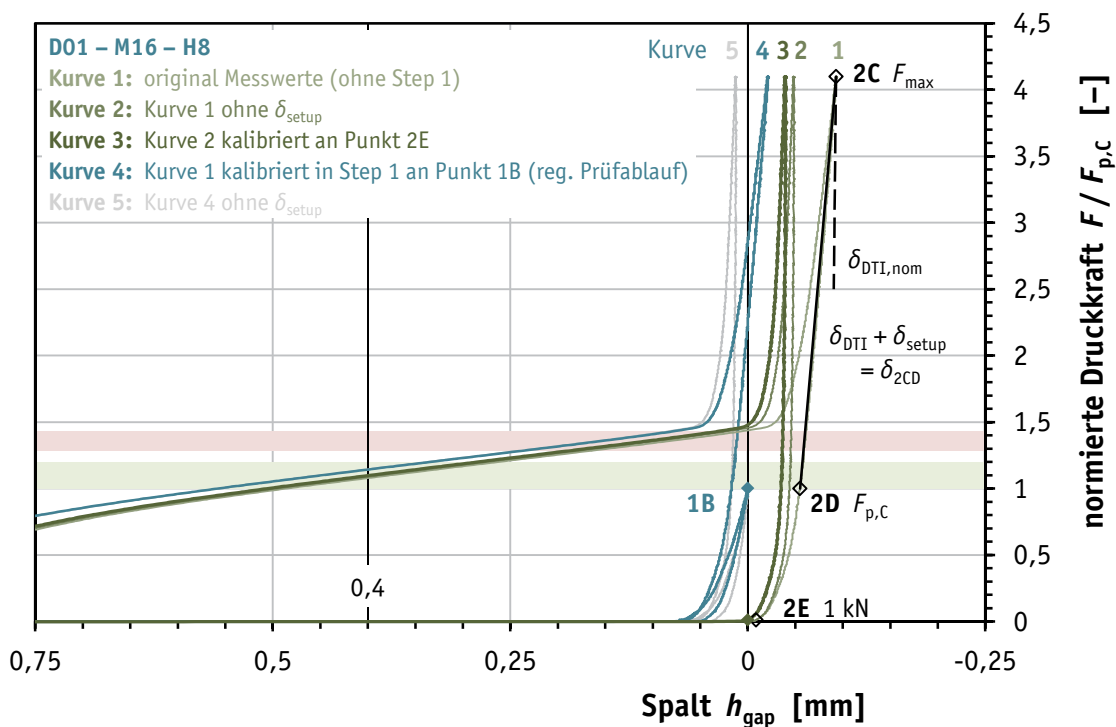
**Tabelle 5.4.** Elastische Nachgiebigkeiten des Versuchsaufbaus des Drucklastversuchs

**Table 5.4.** Elastic resiliences of the test set-up of the compression load test

M16				M20			
	$\delta_{DTI,nom}$	$\delta_{2CD,i}$	$\delta_{setup,i}$		$\delta_{DTI,nom}$	$\delta_{2CD,i}$	$\delta_{setup,i}$
	[mm/kN]	[mm/kN]	[mm/kN]		[mm/kN]	[mm/kN]	[mm/kN]
H8	D01	-1,867 E-5	-1,395 E-4	D13	-1,875 E-5	-1,152 E-4	-9,642 E-5
	D02	-1,867 E-5	-1,469 E-4	D14	-1,875 E-5	-1,088 E-4	-9,002 E-5
	D03	-1,867 E-5	-1,438 E-4	D15	-1,875 E-5	-1,184 E-4	-9,962 E-5
	D04	-1,867 E-5	-1,371 E-4	D16	-1,875 E-5	-1,087 E-4	-8,998 E-5
	D05	-1,867 E-5	-1,431 E-4	D17	-1,875 E-5	-1,056 E-4	-8,685 E-5
H10	D08	-1,860 E-5	-1,397 E-4	D18	-1,522 E-5	-1,042 E-4	-8,902 E-5
	D09	-1,860 E-5	-1,437 E-4	D19	-1,522 E-5	-1,078 E-4	-9,262 E-5
	D10	-1,860 E-5	-1,476 E-4	D20	-1,522 E-5	-1,078 E-4	-9,258 E-5
	D11	-1,860 E-5	-1,476 E-4	D21	-1,522 E-5	-1,186 E-4	-1,034 E-4
	D12	-1,860 E-5	-1,437 E-4	D22	-1,522 E-5	-1,114 E-4	-9,621 E-5
	$\delta_{setup} mean$			<b>-1,246 E-4</b>			
$V$			2,9%				
			5,5%				

Mit der bekannten elastischen Nachgiebigkeit des Versuchsaufbaus lässt sich die experimentell ermittelte Spalt-Druckkraft-Kurve korrigieren, so dass ausschließlich das Verformungsverhalten des DTI wiedergegeben wird. Kurve 2 in Bild 5.3 zeigt dies.

Für die Spalt-Druckkraft-Kurve aus dem regulären Prüfablauf nach EN 14399-9 einschließlich des Abgleichs in Schritt 1 (Punkt 1B) hat die Nachgiebigkeit des Versuchsaufbaus vernachlässigbaren Einfluss auf die Ermittlung der Anzeigerdrucklast  $F_{0,4}$ , siehe Bild 5.3, Kurven 4 und 5. Signifikante Unterschiede bestehen allerdings im Übergangsbereich vom plastischen Abplatten der Überstände hin zum vollständigen Aufliegen auf dem scheibenförmigen Grundkörper. Die Änderung des Gradienten ist für den einzelnen DTI ohne den Einfluss des Versuchsaufbaus größer. Dies ist in der Modellbildung zu berücksichtigen.



**Bild 5.3.** Spalt-Druckkraft-Kurven des Drucklastversuchs unter Berücksichtigung der elastischen Nachgiebigkeit des Versuchsaufbaus und des Abgleichwertes

**Figure 5.3.** Gap-compression load-curves from the compression load test considering the elastic resilience of the test set-up and adjustment value

### 5.2.5.3 Abgleich der Spalt-Druckkraft-Kurve

Die Spalt-Druckkraft-Kurven des regulären Prüfablaufs mit dem Abgleich der Lehre im Schritt 1 weisen am Knickpunkt zwischen dem Abplatten der Überstände und dem vollständigen Lastabtrag durch den Grundkörper eine Differenz zum abgeglichenen Nullpunkt der Höhe des Spaltes  $h_{gap}$  auf, vgl. Bild 4.18 sowie Bild 5.3, Kurve 4. Dies ist nur durch die fortgesetzte Belastung über die Anzeigerdrucklast  $F_{0,4}$  und den Knickpunkt hinaus sichtbar. Der Knickpunkt definiert

zweifelsfrei das Schließen des Spaltes, d.h. das vollständige Abplatten der Überstände, und ist deshalb als Nullpunkt des Spaltes  $h_{\text{gap}}$  zu definieren.

Da sich der Knickpunkt nicht als solcher durch eine singuläre Unstetigkeit in der Kurve auszeichnet, ist dieser nicht unmittelbar bei ansteigender Druckbelastung identifizierbar. Zur Festlegung des Nullpunktes des Spaltes ist vielmehr das Ende des Prüfablaufs mit der Rücknahme der Druckkraft geeignet, siehe Bild 5.3, Punkt 2E. Aufgrund der vollständigen Entlastung sind keine elastischen Stauungen des DTI in der aufgezeichneten Verformung mehr enthalten, im Gegensatz zum Abgleich am Punkt 1B im vorgeschriebenen Prüfablauf nach EN 14399-9. Der Nullabgleich am Punkt 2E führt somit zur korrekten Lage des Knickpunkts und Anzeige der tatsächlichen Höhe des Spaltes  $h_{\text{gap}}$ , siehe Bild 5.3, Kurve 3. Zur fehlerfreien automatischen Erkennung des Punktes 2E wird ein Schwellwert von 1 kN angesetzt.

Im Vergleich zum Abgleich der Spalt-Druckkraft-Kurve nach EN 14399-9 ist diese Auswertung nur nach Beendigung des Versuchs möglich. Die Druckbelastung muss über das vollständige Abplatten der Überstände hinaus durchgeführt werden. Eine Druckkraft von mindestens  $2,5 F_{p,c}$  ist dazu zu empfehlen. Die vollständige Kurve muss aufgezeichnet werden, so dass die Anzeigerdrucklast  $F_{0,4}$  nach Abgleich der Kurve am Endpunkt bestimmt werden kann.

Die Durchführung des ersten Belastungsschritts (Schritt 1) aus dem regulären Prüfablauf erscheint entbehrlich aufgrund des neuen Abgleichwertes. Der Nachweis ist mit den vorliegenden Messergebnissen allerdings nicht zu führen.

Bild 5.3 zeigt deutlich, dass die Änderung des Abgleichwertes für die ermittelbaren Anzeigerdrucklasten  $F_{0,4}$  eine Reduzierung verursacht. Die Unterschiede sind in Tabelle D.3 zusammengestellt. Die größte Reduzierung  $\Delta F_{0,4}$  beträgt 5,5 % (Spalte 6) bzw.  $0,06 F_{p,c}$  (Spalte 7). Die Vorgehensweise liegt auf der sicheren Seite für die Bewertung nach den Annahmekriterien von EN 14399-9.

Für die weiteren Schritte zur Idealisierung der experimentell ermittelten Spalt-Druckkraft-Kurven des DTI erfolgt der Abgleich der Messkurve am Punkt 2E entsprechend Bild 5.3.

#### 5.2.5.4 Elastisch-plastische Nachgiebigkeit des DTI

Das Last-Verformung-Verhalten des DTI ist beim Abplatten der Überstände grundsätzlich nichtlinear, vgl. z.B. Bild 4.18. Nach abgeschlossener Montage der Verbindung und dem Erreichen einer Vorspannkraft oberhalb der Mindestvor-

spannkraft  $F_{p,c}$  ist der Kurvenverlauf bis zum vollständigen Abplatten der Überstände allerdings annähernd linear. Daher lässt sich der Verlauf im relevanten Beanspruchungsbereich einer Betriebsbeanspruchung in guter Näherung linearisieren. Der übrige Teil vom Beginn des Montagevorgangs an kann bei Bedarf durch einen zweiten linearen Kurvenabschnitt vervollständigt werden.

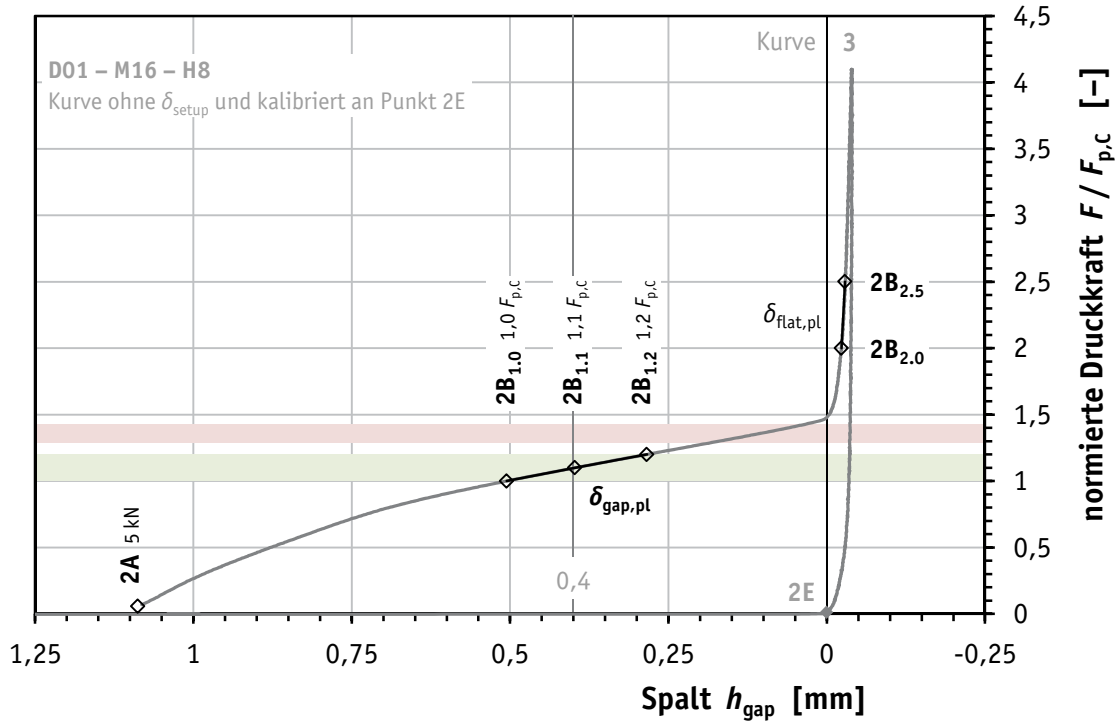
Aufgrund der wesentlichen Bedeutung der irreversibel-plastischen Verformungen gegenüber den zugleich vorhandenen elastischen Verformungen werden die zur Beschreibung des elastisch-plastischen Verformungsverhaltens benötigten nachfolgenden Formelzeichen mit dem Index pl ausgestattet. Dies führt zur Vereinfachung der Formelzeichen und eindeutigen Abgrenzung gegenüber den rein elastischen Verformungen (Index el).

Bild 5.4 zeigt Auswertepunkte zur Bestimmung der elastisch-plastischen Nachgiebigkeit  $\delta_{\text{gap,pl}}$  im Bereich des offenen Spaltes bei 1,0 und 1,2  $F_{p,c}$  (Punkte 2B<sub>1,0</sub> und 2B<sub>1,2</sub>) sowie der elastisch-plastischen Nachgiebigkeit  $\delta_{\text{flat,pl}}$  im Bereich des geschlossenen Spaltes bei 2,0 und 2,5  $F_{p,c}$  (Punkte 2B<sub>2,0</sub> und 2B<sub>2,5</sub>). Der Punkt 2B<sub>1,1</sub> dient der Kontrolle der Linearität des Kurvenabschnitts. Ein Knickpunkt im zulässigen Bereich der Anzeigerdrucklast  $F_{0,4}$  wäre nämlich grundsätzlich möglich. Für den Fall, dass die Nachgiebigkeiten zwischen den Punkten 2B<sub>1,0</sub>–2B<sub>1,1</sub> und 2B<sub>1,0</sub>–2B<sub>1,2</sub> um mehr als 5 % divergieren, kommt der Gradient zwischen den Punkten 2B<sub>1,0</sub> und 2B<sub>1,1</sub> zur Anwendung. Der vollständige Montagevorgang kann mit Hilfe des Punktes 2A zu Beginn des Abplattvorgangs der Überstände modelliert werden.

Aus den individuellen Nachgiebigkeiten der Versuche werden die elastisch-plastischen Nachgiebigkeiten für die Serie als Mittelwert bestimmt. Diese sind in Tabelle D.3 zusammengestellt. Diese Nachgiebigkeiten enthalten, zusätzlich zu dem überwiegenden irreversibel-plastischen Anteil, elastische Verformungsanteile aus den Spalt-Druckkraft-Kurven, die für das Verformungsverhalten unter Entlastung charakteristisch sind.

#### 5.2.5.5 Elastische Nachgiebigkeit des DTI

Die elastische Nachgiebigkeit ist im Wesentlichen von dem belasteten Querschnitt abhängig. Für den Abplattvorgang der Überstände ist es ausgeschlossen, sinnvolle Annahmen für die veränderliche Querschnittsfläche der Überstände zu finden. Daher werden die vorliegenden Drucklastversuche mit erweitertem Prüfablauf und zwischenzeitlichen Entlastungen herangezogen, um jeweils die vom aufge-



**Bild 5.4.** Auswertepunkte zur Ermittlung abschnittsweiser elastisch-plastischer Nachgiebigkeiten

**Figure 5.4.** Evaluation for sectional elastic-plastic resiliences

prägen Beanspruchungsniveau abhängige elastische Nachgiebigkeit bei vorhandenem Spalt bestimmen zu können.

Die gewählten Auswertepunkte unter den zur Verfügung stehenden Beanspruchungsniveaus sind in Bild 5.5 dargestellt. Es handelt sich jeweils um die 0,4- und 0,8-fache Druckkraft, die vor Beginn der Entlastung erreicht wurde. Die Auswertung erfolgt auf dem Lastpfad der Wiederbelastung. Die individuellen Nachgiebigkeiten sowie deren Mittelwerte aus Versuchen gleichartiger DTI und identischer Belastung sind in Tabelle D.4 zusammengestellt.

Die Verringerung der elastischen Nachgiebigkeit bei zunehmendem Beanspruchungsniveau bzw. abnehmender Höhe der Überstände ist ersichtlich, siehe Bild 5.6. Sie ist begrenzt durch die Nachgiebigkeit des scheibenförmigen Grundkörpers, die aufgrund der in Kapitel 5.2.5.2 durchgeführten rechnerischen Eliminierung der Nachgiebigkeit des Versuchsaufbaus mit der nominellen Nachgiebigkeit identisch ist. Die Entwicklung der elastischen Nachgiebigkeit lässt sich vereinfachend durch folgende Exponentialfunktion idealisieren:

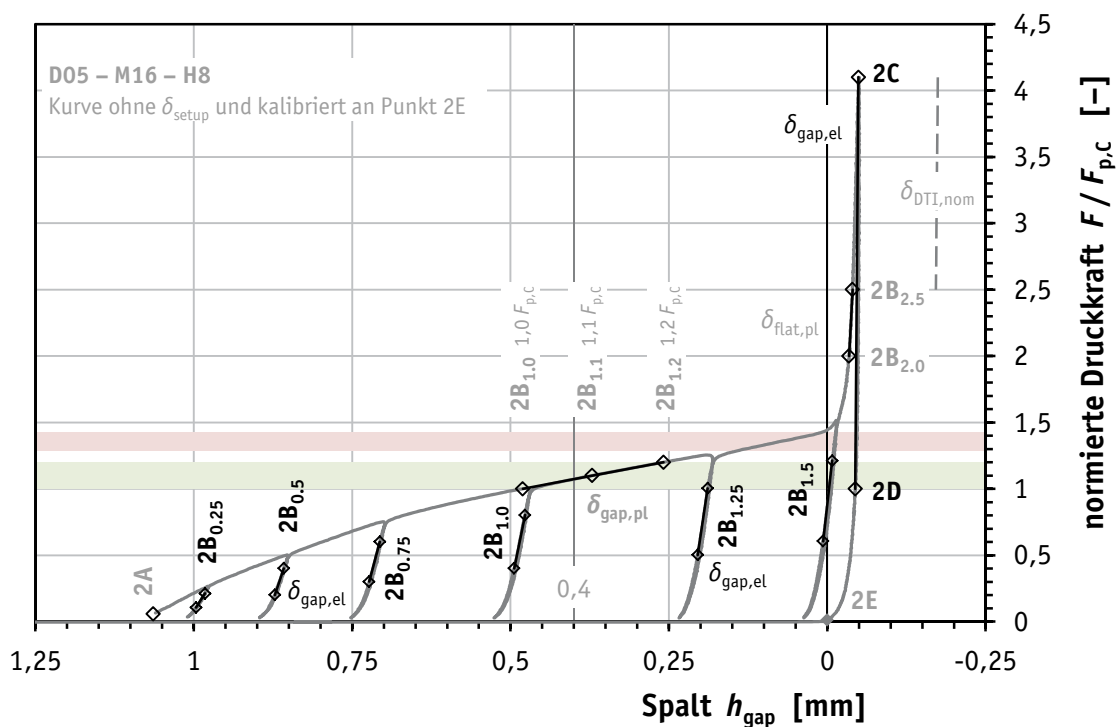
$$\delta_{\text{gap,el}} \left( F/F_{p,c} \right) = a \cdot e^{\left( b \cdot F/F_{p,c} \right)} \quad (5.25)$$

Die entsprechenden Regressionsfunktionen sind für jede Serie in Bild 5.6 eingetragen. Die Koeffizienten  $a$  und  $b$  der Regressionsfunktionen sind in Tabelle 5.5 zusammengestellt. Für Druckkräfte oberhalb des Grenzwertes  $\lim(F/F_{p,c})$  ist die elastische Nachgiebigkeit mit dem nominellen Wert  $\delta_{DTI,nom}$  anzusetzen.

Da für die Serie M16–H10–Los A10 keine Ergebnisse von Drucklastversuchen mit zwischenzeitlichen Entlastungen vorliegen, wird die elastische Nachgiebigkeit  $\delta_{gap,el}$  näherungsweise von Serie M16–H8 übernommen. Dies ist möglich, da die Last-Verformung-Kurven beider Serien im absoluten Maßstab der Druckkraft eine große Ähnlichkeit aufweisen, siehe Bild 4.17 (a).

### 5.2.5.6 Idealisierte Spalt-Druckkraft-Kurve

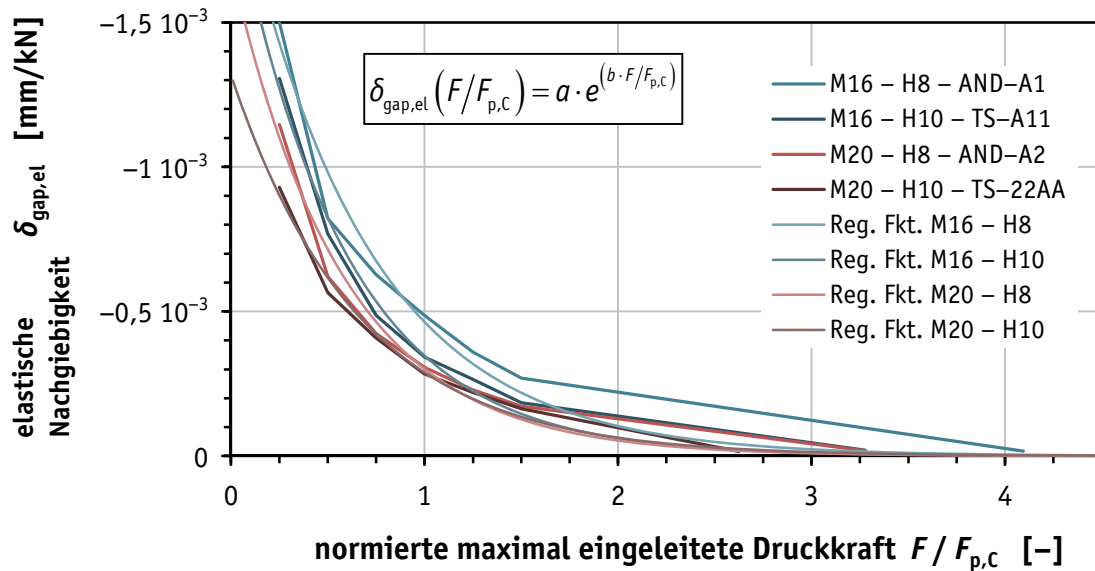
Das Last-Verformung-Verhalten der direkten Kraftanzeiger unterschiedlicher Serien lässt sich mit Hilfe der experimentell bestimmten elastischen Nachgiebigkeiten entsprechend Tabelle 5.5 und der plastischen Nachgiebigkeiten entsprechend Tabelle 5.6 beschreiben. Aufgrund der geringen Streuungen der Spalt-Druckkraft-Kurven repräsentiert die aus den Mittelwerten an den unterschiedlichen Auswertestellen bestimmte idealisierte Kurve die jeweilige Serie in guter



**Bild 5.5.** Auswertepunkte zur Ermittlung der lastabhängigen elastischen Nachgiebigkeiten

**Figure 5.5.** Evaluation for load-dependent elastic resiliances

Näherung. Bild 5.7 zeigt exemplarisch die experimentell ermittelten Spalt-Druckkraft-Kurven der Serie M16 – H8, für die jeweils die zunächst erfasste Nachgiebigkeit des Versuchsaufbaus eliminiert wurde und der Abgleich der Kurve mit dem Ende des Versuchs als Nullpunkt erfolgte.



**Bild 5.6.** Elastische Nachgiebigkeiten bei vorhandenem Spalt in Abhängigkeit der maximal eingeleiteten Druckkraft für unterschiedliche DTI

**Figure 5.6.** Elastic resiliences with existing gap, depending on the maximum applied compression load for various DTI

**Tabelle 5.5.** Koeffizienten der Regressionsfunktionen für die elastischen Nachgiebigkeiten bei vorhandenem Spalt in Abhängigkeit der maximal eingeleiteten Druckkraft

**Table 5.5.** Coefficients of the regression functions for the elastic resiliences with existing gap, depending on the maximum applied compression load

		<b>M16 – H8</b>	<b>M16 – H10</b>	<b>M20 – H8</b>	<b>M20 – H10</b>
		AND-A1	TS-A11	AND-A2	TS-22AA
<b>a</b>	[mm/kN]	$-2,079 \cdot 10^{-3}$	$-1,959 \cdot 10^{-3}$	$-1,697 \cdot 10^{-3}$	$-1,318 \cdot 10^{-3}$
<b>b</b>	[–]	–1,500	–1,731	–1,728	–1,517
<b>B<sup>a</sup></b>	[kN <sup>–1</sup> ]	$-1,706 \cdot 10^{-2}$	$-1,575 \cdot 10^{-2}$	$-1,260 \cdot 10^{-2}$	$-0,8845 \cdot 10^{-2}$
$F_{p,c}$	[kN]	88	110	137	172
$\lim(F/F_{p,c})$	[–]	3,14	2,69	2,61	2,94
$\delta_{DTI,nom}^b$	[mm/kN]	$-1,867 \cdot 10^{-5}$	$-1,860 \cdot 10^{-5}$	$-1,875 \cdot 10^{-5}$	$-1,522 \cdot 10^{-5}$

<sup>a</sup> alternativ:  $\delta_{gap,el}(F) = a \cdot e^{(B \cdot F)}$  mit  $B = b/F_{p,c}$  und  $F \geq 0$

<sup>b</sup> nominelle elastische Nachgiebigkeit des scheibenförmigen Grundkörpers bei vollständig abgeplatteten Überständen

Der mittlere Kurvenabschnitt der idealisierten Spalt-Druckkraft-Kurve mit der Nachgiebigkeit  $\delta_{\text{gap,pl}}$  verläuft durch den Punkt der gemittelten Anzeigerdrucklasten  $F_{0,4}$  bei einem Spalt von 0,4 mm. Die untere Begrenzung erfolgt durch eine Druckkraft von  $0,8 F_{p,c}$ . Der Kurvenzug setzt sich in diese Richtung fort bis zum Spalt  $h_{\text{gap,ini}}$ , der die Oberfläche der unverformten Überstände darstellt. Die Nachgiebigkeit  $\delta_{\text{ini,pl}}$  lässt sich entsprechend aus den begrenzenden Punkten ermitteln und ist in Tabelle 5.6 enthalten.

Die obere Begrenzung des mittleren Kurvenabschnitts erfolgt durch den Schnittpunkt mit dem Abschnitt des geschlossenen Spaltes bei der Druckkraft  $F_{\text{flat}}$ . Dieser Abschnitt ist definiert durch den Mittelwert des Spaltes bei einer Druckkraft von  $2,5 F_{p,c}$  und der plastischen Nachgiebigkeit  $\delta_{\text{flat,pl}}$ . Der Schnittpunkt bzw. Knickpunkt liegt aufgrund dieser Festlegung nicht zwangsläufig bei einem Spalt  $h_{\text{gap}}$  von null, bedingt durch den realen stetigen Kurvenverlauf. Plastische Verformungen können so allerdings konservativ erfasst werden.

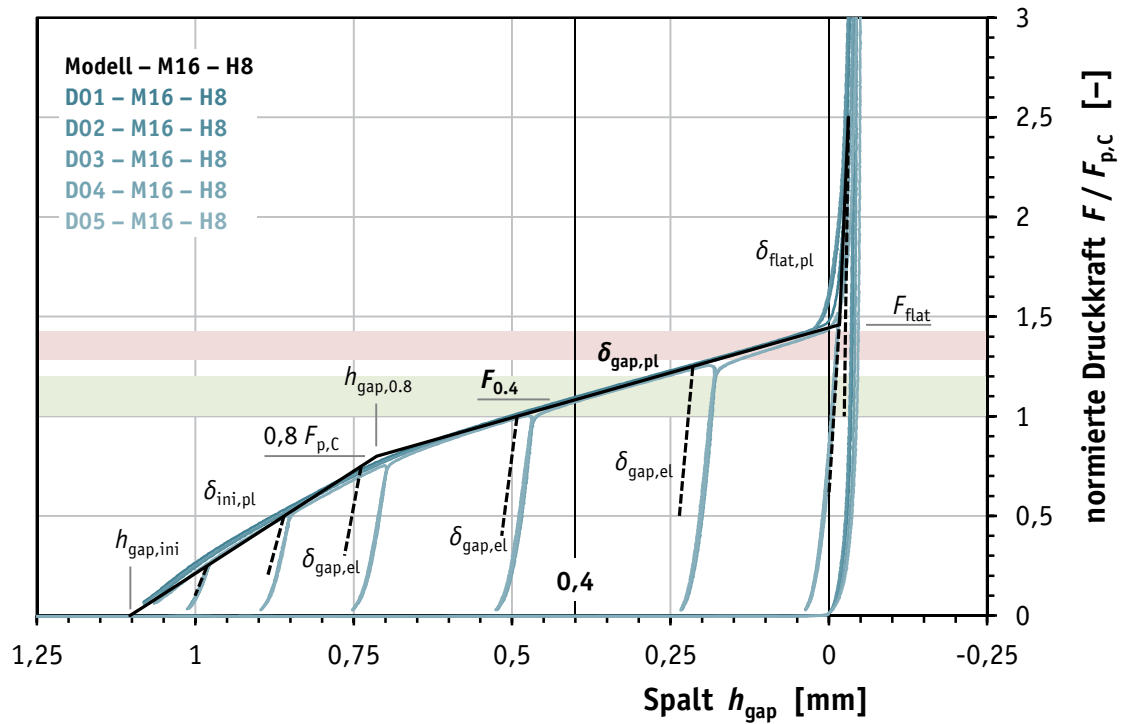
Die aus den Kennwerten entsprechend Tabelle 5.6 resultierenden Spalt-Druckkraft-Kurven der vorliegenden Serien sind in Bild 5.8 zusammenfassend dargestellt. Diese gehen in die Modellierung der vollständigen Schraubenverbindung mit direktem Kraftanzeiger ein.

**Tabelle 5.6.** Modellkennwerte der direkten Kraftanzeiger

**Table 5.6.** Model parameters of the direct tension indicators

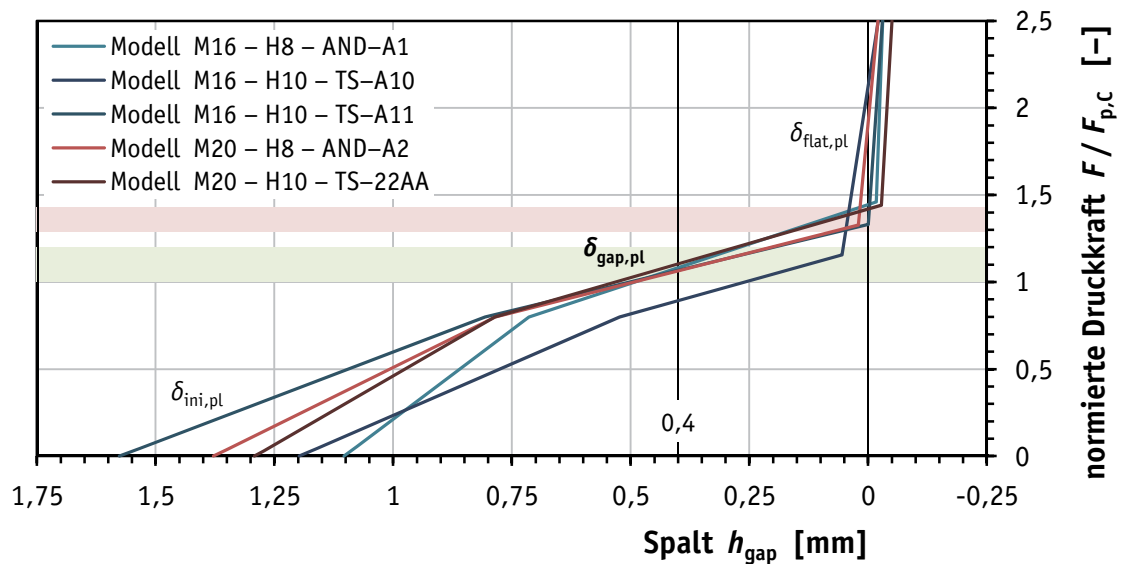
	<b>M16 – H8</b>	<b>M16 – H10</b>		<b>M20 – H8</b>	<b>M20 – H10</b>
	AND-A1	TS-A10	TS-A11	AND-A2	TS-22AA
$h_{\text{gap,ini}}$	1,10	1,20	1,58	1,38	1,29
$h_{\text{gap,0.8}}$ [mm]	0,71	0,52	0,81	0,78	0,79
$h_{\text{flat}}$	–0,017	0,055	0,000	0,020	–0,028
$h_{\text{flat,2.5}}$	–0,031	–0,022	–0,030	–0,020	–0,050
$F_{0.4}$ [kN]	95,2	98,2	117,3	146,1	189,3
$F_{\text{flat}}$	128,3	127,1	146,3	182,0	247,2
$\delta_{\text{ini,pl}}$	–5,539 E-3	–7,673 E-3	–8,762 E-3	–5,407 E-3	–3,689 E-3
$\delta_{\text{gap,pl}}$ [mm/kN]	–1,261 E-2	–1,195 E-2	–1,381 E-2	–1,058 E-2	–7,402 E-3
$\delta_{\text{flat,pl}}$	–1,543 E-4	–5,189 E-4	–2,299 E-4	–2,543 E-4	–1,194 E-4
$\delta_{\text{flat,nom}}$	–1,867 E-5	–1,834 E-5	–1,860 E-5	–1,875 E-5	–1,522 E-5





**Bild 5.7.** Idealisierte Spalt-Druckkraft-Kurve des DTI der Serie M16-H8 mit abschnittsweisen (elastisch-)plastischen und elastischen Nachgiebigkeiten

**Figure 5.7.** Idealized gap-compression load-curve for the DTI of series M16-H8 with sectional (elastic-)plastic and elastic resiliences



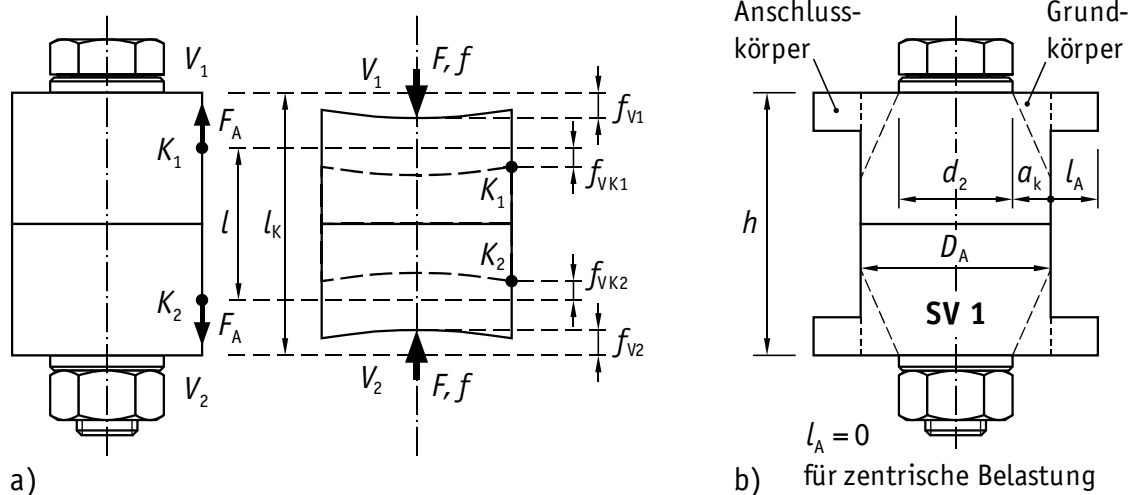
**Bild 5.8.** Idealisierte Spalt-Druckkraft-Kurven mit abschnittsweise (elastisch-)plastischen Nachgiebigkeiten für unterschiedliche DTI

**Figure 5.8.** Idealized gap-compression load-curves with sectional (elastic-)plastic resiliences for various DTI

### 5.3 Krafteinleitungsfaktor

Der Krafteinleitungsfaktor beschreibt die Lage und Wirkung des Lasteinleitungs-ortes innerhalb der Bauteile. Er kann anschaulich als Verhältnis des Abstandes der beiden Lasteinleitungsebenen zur Gesamthöhe der Bauteile betrachtet werden. Die Berechnung des Krafteinleitungsfaktors ist nach VDI 2230-1 unter Voraussetzung der bekannten bzw. zu bestimmenden Verformungen  $f_{VK}$  und  $f_V$  im Montagezustand nach Bild 5.9 (a) wie folgt möglich:

$$n = \frac{f_{VK1} + f_{VK2}}{f_{V1} + f_{V2}} \quad (5.26)$$



**Bild 5.9.** Ermittlung des Krafteinleitungsfaktors nach VDI 2230-1, Ermittlung aus Verformungen (a) und vereinfachte Ermittlung aus Verbindungstypen (b)

**Figure 5.9.** Determination of the load introduction factor according to VDI 2230-1, determination from deformations (a) and simplified determination from joint types (b)

Die Ermittlung der Verformungen  $f_{VK}$  und  $f_V$  erfolgt für die vorliegenden axial-symmetrischen Vorspannkörper mit Ringflansch mit Hilfe eines einfachen Finite-Elemente-Modells. Die Verformungen und der resultierende Krafteinleitungsfaktor sind für ausgewählte Abmessungsverhältnisse in Tabelle 5.7 zusammengestellt. Die Werte für sämtliche Bauteil-Zugversuche sind in Anhang D.3, Tabelle D.5 enthalten.

Entsprechend VDI 2230-1 ist eine vereinfachte Ermittlung des Krafteinleitungsfaktors möglich, sofern „eine nicht-klaffende Verbindung prismatischer Gestalt [...], bei der die resultierenden Betriebskräfte beider Platten näherungsweise auf

einer Wirkungslinie liegen“ [VDI 2230-1], vorliegt. Beide Bedingungen sind erfüllt. Ein mögliches Klaffen der Verbindung führt ohnehin zu veränderten Gleichgewichtsbedingungen und wird gesondert berücksichtigt.

Mit den bekannten Abmessungen entsprechend Bild 5.9 (b), der Höhe  $h$ , dem Abstand  $a_k$  und der Länge  $l_A$  sowie dem Anschlusstyp wird der Krafteinleitungsfaktor nach VDI 2230-1, Tabelle 2 bestimmt. Der Anschlusstyp ist dabei die vereinfachte Kategorisierung der Lage des Anschlusskörpers in Bezug zum Grundkörper und dem darin liegenden Verformungskörper. Für die zentrische Beanspruchung ist die Länge  $l_A$  mit null anzusetzen. Die Abmessungen und der resultierende Krafteinleitungsfaktor sind in den Tabellen 5.7 und D.5 zusammengestellt.

Es ist ersichtlich, dass die vereinfachte Ermittlung für den Krafteinleitungsfaktor größere Werte liefert. Dies ist in VDI 2230-1 planmäßig vorgesehen, so dass daraus auf der sicheren Seite größere Schraubenzusatzkräfte ermittelt werden. Im Sinne der Empfehlung in [KTW07] werden beide Niveaus für die späteren Berechnungen mit Hilfe des Verspannungsschaubildes berücksichtigt, vgl. exemplarisch Bild 5.18 und Anhang D.6. Die Empfehlung nach [IE01], den Krafteinleitungsfaktor mangels genauer Kenntnis des Lasteinleitungsortes zu 0,5 abzuschätzen, erweist sich für die vorliegenden Verhältnisse der Bauteil-Zugversuche als brauchbare Alternative.

**Tabelle 5.7.** Krafteinleitungsfaktoren für verwendete Abmessungen der Bauteil-Zugversuche  
**Table 5.7.** Load introduction factors for the used dimensions of component tensile tests

	VDI 2230-1											
									Tab. 2	Gl. 76		
	$D_A$	$d_2$	$h$	$a_k$	$l_A$	$a_k/h$	$l_A/h$	Typ	$n^a$	$n^b$	$\Sigma f_V$	$\Sigma f_{VK}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]		[-]	[-]	[mm]	[mm]
<b>M16 × 90</b>	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	<b>0,45</b>	<b>0,25</b>	4,0	1
<b>M16 × 100</b>	51	30	69	10,5	0	0,15	0	SV 1	<b>0,48</b>	<b>0,31</b>	3,2	1
<b>M16 × 100</b>	51	30	70	10,5	0	0,15	0	SV 4	<b>0,32</b>	<b>0,26</b>	3,9	1
<b>M20 × 80</b>	51	37	46	7	0	0,15	0	SV 1	<b>0,48</b>	<b>0,29</b>	3,4	1
<b>M20 × 110</b>	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	<b>0,56</b>	<b>0,48</b>	2,1	1

<sup>a</sup> vereinfachte Ermittlung aus Verbindungstypen nach VDI 2230-1, Bild 22 und Tabelle 2, siehe Bild 5.9 (b)

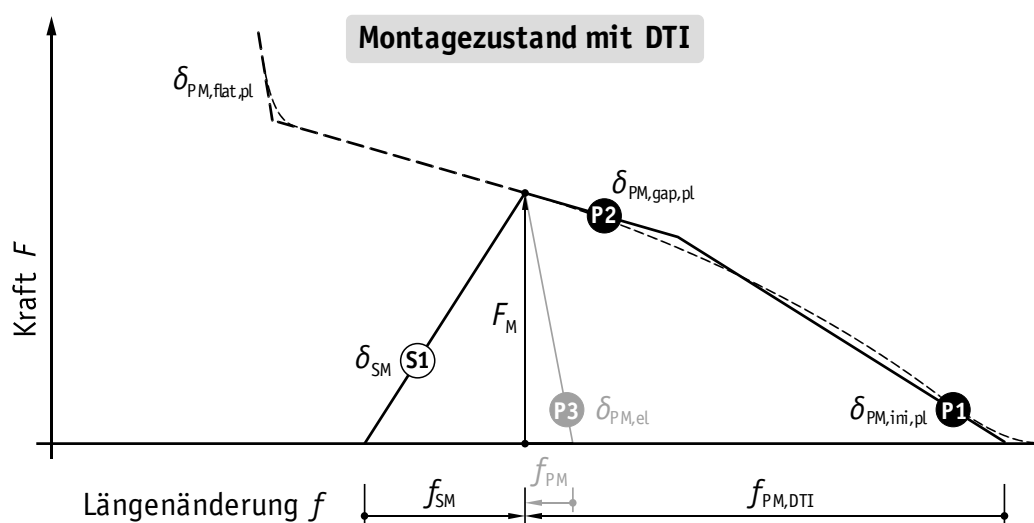
<sup>b</sup> Ermittlung aus Verformungen nach VDI 2230-1, Gl. 76 bzw. Gleichung (5.26) unter Verwendung eines einfachen Finite-Elemente-Modells

## 5.4 Erweiterung des Verspannungsschaubildes

### 5.4.1 Nachgiebigkeit des direkten Kraftanzeigers

Das Verspannungsschaubild der gewöhnlichen Schraubenverbindung, wie es in Bild 2.3 für den Montagezustand und in Bild 2.4 für den Betriebszustand dargestellt ist, ist in den dargestellten Proportionen der Nachgiebigkeiten von Schraubengarnitur ( $\delta_s$ ) und Bauteilen ( $\delta_p$ ) unter Hinzunahme eines direkten Kraftanzeigers nicht mehr repräsentativ. Die vielfach größere (elastisch-)plastische Nachgiebigkeit  $\delta_{\text{gap,pl}}$  des DTI, d.h. der maßgebende Anteil der Nachgiebigkeit  $\delta_{\text{PM,gap,pl}}$ , sorgt für wesentlich größere Verformungen  $f_{\text{PM,DTI}}$  im Montagevorgang auf der Seite der Bauteile mit DTI, siehe Bild 5.10. Im Bild ist das reale Kraft-Verformungs-Verhalten eines DTI, bekannt aus dem Drucklastversuch, zusammen mit der bilinearen Idealisierung des Kurvenverlaufs schematisch dargestellt.

Nach Abschluss des Montagevorgangs und mit Beginn der Betriebsbeanspruchung wirkt die Nachgiebigkeit des DTI ( $\delta_{\text{gap,pl}}$ ) zusammen mit den Nachgiebigkeiten der Schraubengarnitur ( $\delta_s$ ), der flachen Scheiben ( $\delta_{\text{shb}}$ ) und der beanspruchten Bauteilbereiche infolge der Krafteinleitung ( $[1-n]\delta_p$ ), siehe Tabelle 5.8. Der vorhandene Restspalt des DTI steht dabei bis zum vollständigen Abplatten der Überstände und zugehörigen Übergang in die Nachgiebigkeit  $\delta_{\text{SA,flat,pl}}$  als plastisch verformbare Länge zur Verfügung, siehe Bild 5.11. Die schematische Darstellung berücksichtigt keine plastische Verformung der Schraubengarnitur, die bei einer Überbeanspruchung derselben zwangsläufig auftreten würde.

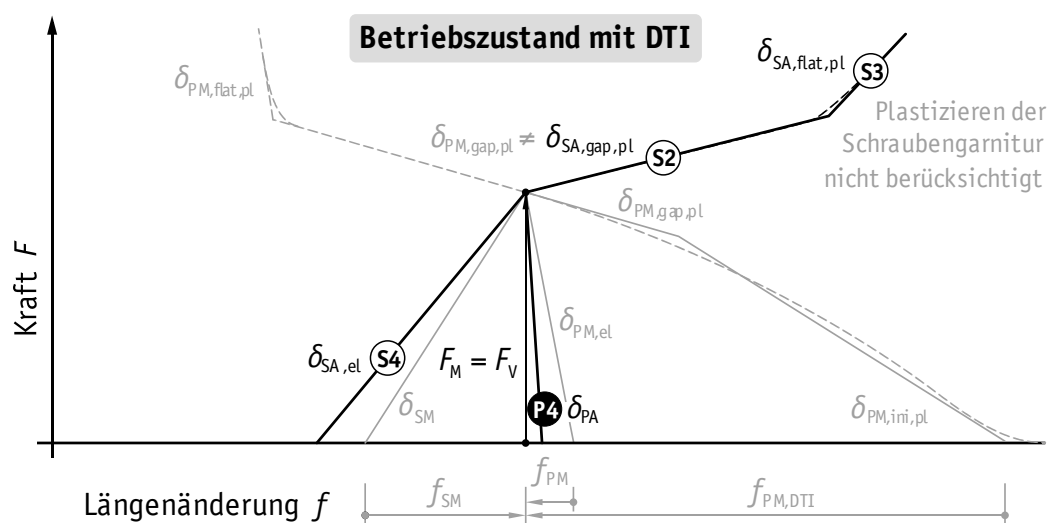


**Bild 5.10.** Verspannungsschaubild für den Montagezustand mit DTI (schematisch)

**Figure 5.10.** Joint diagram in the assembly state with DTI (schematic)

**Tabelle 5.8.** Zusammensetzung der Nachgiebigkeiten für Montage und Betrieb**Table 5.8.** Addition of the resiliances for the assembly and working state

$\Sigma \delta_i$		Nachgiebigkeiten $\delta_i$ der Komponenten							
	Kennz. <sup>a</sup>	Shr/Mu	Shb	Direkter Kraftanzeiger				Bauteile <sup>b</sup>	
		$\delta_S$	$\delta_{Shb}$	$\delta_{ini,pl}$	$\delta_{gap,pl}$	$\delta_{flat,pl}$	$\delta_{gap,el}$	$(1-n) \delta_P$	$n \delta_P$
Montage	$\delta_{SM}$	S1	●						
	$\delta_{PM}$	c		●				●	●
	$\delta_{PM,ini,pl}$	P1		●				●	●
	$\delta_{PM,gap,pl}$	P2			●			●	●
	$\delta_{PM,flat,pl}$	d				●		●	●
	$\delta_{PM,el}$	P3					●	●	●
Betrieb	$\delta_{SA,gap,pl}$	S2	●		●			●	
	$\delta_{SA,flat,pl}$	S3	●			●		●	
	$\delta_{SA,el}$	S4	●				●	●	
	$\delta_{PA}$	P4							●
(Gleichung)/Bild		(5.8)	(5.22)	5.7	5.4	5.4	5.5/5.6	(5.20), (5.21)	

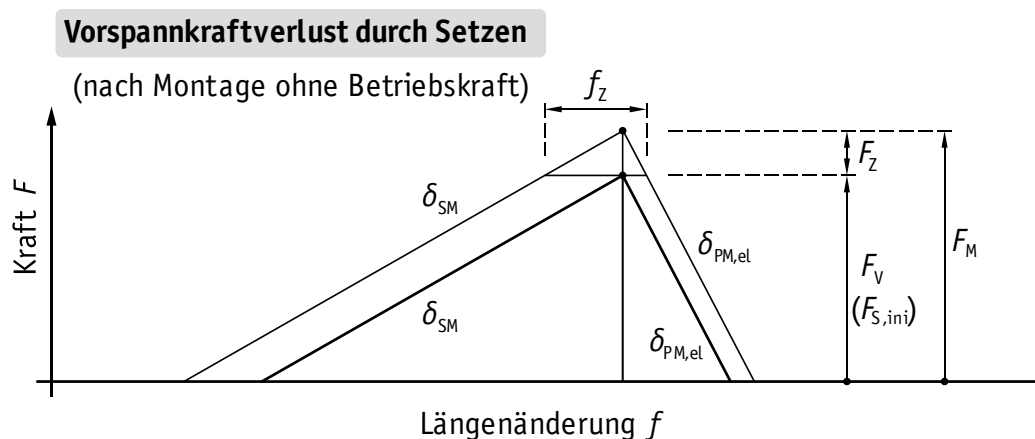
<sup>a</sup> Kennzeichnung in den Bildern 5.10 und 5.11<sup>b</sup> Aufteilung der Nachgiebigkeit  $\delta_P$  in Abhängigkeit vom Krafteinleitungsfaktor  $n$ ; für die Montage nicht erforderlich<sup>c</sup> Nachgiebigkeit für die Montage ohne direkten Kraftanzeiger<sup>d</sup> Bei regelkonformer Montage nach EN 1090-2 nicht erforderlich, da das vollständige Schließen aller Spalte nicht zulässig ist**Bild 5.11.** Verspannungsschaubild für den Betriebszustand mit DTI (schematisch)**Figure 5.11.** Joint diagram in the working state with DTI (schematic)

### 5.4.2 Vorspannkraftverluste durch Setzen

Vorspannkraftverluste können auf Grundlage des Verspannungsschaubildes mit Hilfe der bekannten Nachgiebigkeiten äquivalent durch den Setzbetrag  $f_z$  ausgedrückt werden. Bild 5.12 zeigt den mechanischen Zusammenhang für die montierte Verbindung ohne äußere Beanspruchung. Dabei sind die Nachgiebigkeiten aus dem Montagevorgang entsprechend Bild 5.10 zu berücksichtigen. Für den direkten Kraftanzeiger zusammen mit den Bauteilen ist dies die elastische Nachgiebigkeit  $\delta_{PM,el}$  u. a. für das Rückfedern der gestauchten Überstände. Nach VDI 2230-1 erfolgt die Bestimmung des Vorspannkraftverlustes  $F_z$  bei bekanntem Setzbetrag  $f_z$  wie folgt:

$$F_z = \frac{f_z}{\delta_s + \delta_p} \quad (5.27)$$

Für den Fall, dass keine genauen Erkenntnisse über das Setzverhalten der zu betrachtenden unbeanspruchten wie auch beanspruchten Schraubenverbindung vorliegen, bietet VDI 2230-1 Richtwerte zur Abschätzung des Setzbetrages. Diese berücksichtigen in Abhängigkeit von der Art der Kontaktfläche deren mittlere Rautiefe und Beanspruchungsart. Es wird unterschieden zwischen dem gepaarten Gewinde, der Auflagefläche von Kopf und Mutter sowie den sonstigen inneren Trennfugen. Für sämtliche Kontaktflächen sind die einzelnen Setzbeträge aufzusummieren. Die Richtwerte gelten allerdings nicht bei Überschreitung der entsprechenden Grenzflächenpressungen. Somit ist der Einfluss der Anzahl der



**Bild 5.12.** Verspannungsschaubild mit Vorspannkraftverlust  $F_z$  aufgrund eines Setzbetrages  $f_z$  (schematisch)

**Figure 5.12.** Joint diagram with preload reduction  $F_z$  due to an amount of embedding  $f_z$  (schematic)

Trennfugen bzw. Kontaktflächen als wesentlicher Anteil der Vorspannkraftverluste berücksichtigt. Durch eine Verkleinerung des Kraftverhältnisses bzw. relativen Nachgiebigkeitsverhältnisses  $\Phi$  ( $=\Phi_{el}$ ), vgl. Bild 2.4 und Tabelle 5.9, z.B. durch die Vergrößerung der Nachgiebigkeit  $\delta_s$  der Garnitur, können die Vorspannkraftverluste bei unveränderter Anzahl der Trennfugen reduziert werden.

Es sei besonders darauf hingewiesen, dass die Richtwerte für die Setzbeträge für metallisch blanke Oberflächen gelten. Auf die Schraubenverbindung im Stahlbau sind diese Bedingungen nicht übertragbar. Eine Ausführung der Bauteile mit gestrahlten Oberflächen und mindestens einer Beschichtung oder einer Feuerverzinkung entspricht bei weitem nicht den Voraussetzungen der VDI 2230-1. Darüber hinaus sind die Möglichkeiten zur Herstellung von Ebenheit und Parallelität der Trennfugen ungünstiger als z.B. im Maschinenbau. Daher ist von größeren Setzbeträgen und dementsprechend größeren Vorspannkraftverlusten auszugehen.

In den vorliegenden experimentellen Untersuchungen wurde die Schraubenkraft und damit auch der Vorspannkraftverlust gemessen. Für den direkten Kraftanzeiger, dessen Überstände in der Montage verfahrensbedingt bis an die geometrisch-werkstoffliche Grenzflächenpressung belastet sind, sind in dieser Kontaktfläche die Richtwerte der VDI 2230-1 nicht anwendbar. Daher wird auf die Verwendung der Richtwerte für den Setzbetrag nach VDI 2230-1 vollständig verzichtet, auch wenn diese für die Schraubengarnitur, die Scheiben und die unbeschichteten Vorspannkörper der vorliegenden Versuche anwendbar wären.

Aus den gemessenen Vorspannkraftverlusten lassen sich bei Bedarf die Setzbeträge nach Gleichung (5.27) berechnen. Im Übrigen ist die experimentelle Bestimmung der Vorspannkraftverluste an einer vorliegenden Verbindung im Allgemeinen empfehlenswert, in besonderen Fällen notwendig. Die Verwendung des direkten Kraftanzeigers ist ein besonderer Fall.

### 5.4.3 Klaffen der Trennfuge

Das Klaffen der Trennfuge einer Verbindung ist gemäß VDI 2230-1 im Maschinenbau im Allgemeinen zu verhindern, um der Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit und dem Verlust der Tragfähigkeit vorzubeugen. Dieses Prinzip ist in den Regeln der VDI 2230-1 verankert. Für Fälle von einseitigem Klaffen bei exzentrischem Kraftangriff sind gesonderte Betrachtungen vorgesehen, die allerdings nicht den Regelfall der Anwendung der Richtlinie darstellen. Für die zentrisch verspannte und zentrisch belastete Einschraubenverbindung ist das Gleich-

gewicht von Kräften und Verformungen für das Klaffen in VDI 2230-1 nicht ausdrücklich formuliert und integriert.

Mit dem Wissen um das Last-Verformung-Verhalten des direkten Kraftanzeigers ist es nicht auszuschließen, dass eine Verbindung mit DTI durch axiale Zugbeanspruchung und Vorspannkraftverluste im Rahmen der üblichen Betriebsbedingungen ein Klaffen der Trennfuge zeigt. Daher muss das Modell der vorgespannten Verbindung mit DTI das Klaffen der Trennfuge bei der Ermittlung der Schraubenkraft und Verformungen berücksichtigen.

#### 5.4.4 Verspannungsschaubild und Kennwerte

In Abhängigkeit von den Nachgiebigkeitsverhältnissen, der Beanspruchungsgeschichte, der aktuellen Vorspannkraft und der einwirkenden Axialkraft sind zur Bestimmung der Schraubenkraft bzw. der Schraubenzusatzkraft und gegebenenfalls der Vorspannkraftverluste folgende Fälle in der Modellbildung zu unterscheiden:

- *Fall A:* kein Klaffen der Trennfuge und ausschließlich elastische Verformungen (Optimum),
- *Fall B:* klaffende Trennfuge und ausschließlich elastische Verformungen,
- *Fall C:* klaffende Trennfuge und darauffolgende plastische Verformungen,
- *Fall D:* kein Klaffen der Trennfuge, aber trotzdem plastische Verformungen,
- *Fall E:* plastische Verformungen und darauffolgend klaffende Trennfuge.

Der optimale Fall im Sinne von größter Dauerhaftigkeit der Verbindung durch geringe Schraubenzusatzkräfte und ohne Vorspannkraftverluste, d. h. *Fall A*, ist in Bild 5.13 dargestellt. Für die hier vorliegenden Kraft- und Verformungsverhältnisse ist das Verspannungsschaubild entsprechend VDI 2230-1 anwendbar, da ein Klaffen der Trennfuge ausgeschlossen ist und sämtliche Verformungen, einschließlich derer des DTI, als elastisch angenommen werden. Darüber hinaus wird in Bild 5.13 (a) und (b) zwischen der Reihenfolge eines Auftretens des Klaffens der Trennfuge und des weiteren plastischen Abplattens der Überstände des DTI bei weiterer Steigerung der Axialkraft  $F_A$  unterschieden, die die Betrachtung der *Fälle B bis E* erfordert. Diese sind vollständig in Anhang D.4 dargestellt.

Bild 5.14 (a) zeigt schematisch das Verspannungsschaubild für den *Fall E*. Die Axialkraft  $F_A$  verursacht bei klaffender Trennfuge eine Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$ . Durch das Klaffen der Trennfuge ist die anliegende Schraubenkraft  $F_{S,act}$  identisch mit der Axialkraft  $F_A$ . Sie übersteigt die in der Belastungsgeschichte der Verbin-



dung vormals größte Schraubenkraft  $F_{S,\max}$ . Diese maximale Schraubenkraft  $F_{S,\max}$  wird mindestens die Größe der Montagevorspannkraft  $F_M$  haben, bei vorherigen Lastwechseln mit ausreichend großer Axialkraft auch darüber liegen. Ein solcher Lastwechsel ist mit *Fall E* gegeben. Durch die erstmalig große Schraubenkraft erfahren die Überstände des DTI ein weiteres plastisches Abplatten. Die entsprechende Nachgiebigkeit  $\delta_{SA,pl}$  bei plastischer Verformung ist vielfach größer als die elastische Nachgiebigkeit  $\delta_{SA,el}$ . Der Übergang ist durch das Abknicken der Last-Verformung-Kurve definiert.

Eine verhältnismäßig geringe Steigerung der Axialkraft führt im Bereich des plastischen Abplattens zu großen Verformungen, die im *Fall E* zum Klaffen der Trennfuge führen, siehe Bild 5.14 (a). Die Axialkraft  $F_{Aop,el-pl}$  an der Abhebegrenze zum Klaffen der Trennfuge ist entsprechend Tabelle 5.9 unter Berücksichtigung der elastisch-plastischen Verformung zu bestimmen. Die zur Berechnung der Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$  und der Verformung  $f_{SA}$  erforderlichen Gleichungen sind in Tabelle 5.10 zusammengestellt. Die im betrachteten Lastwechsel unter Axialkraft vorherrschende Schraubenkraft beträgt:

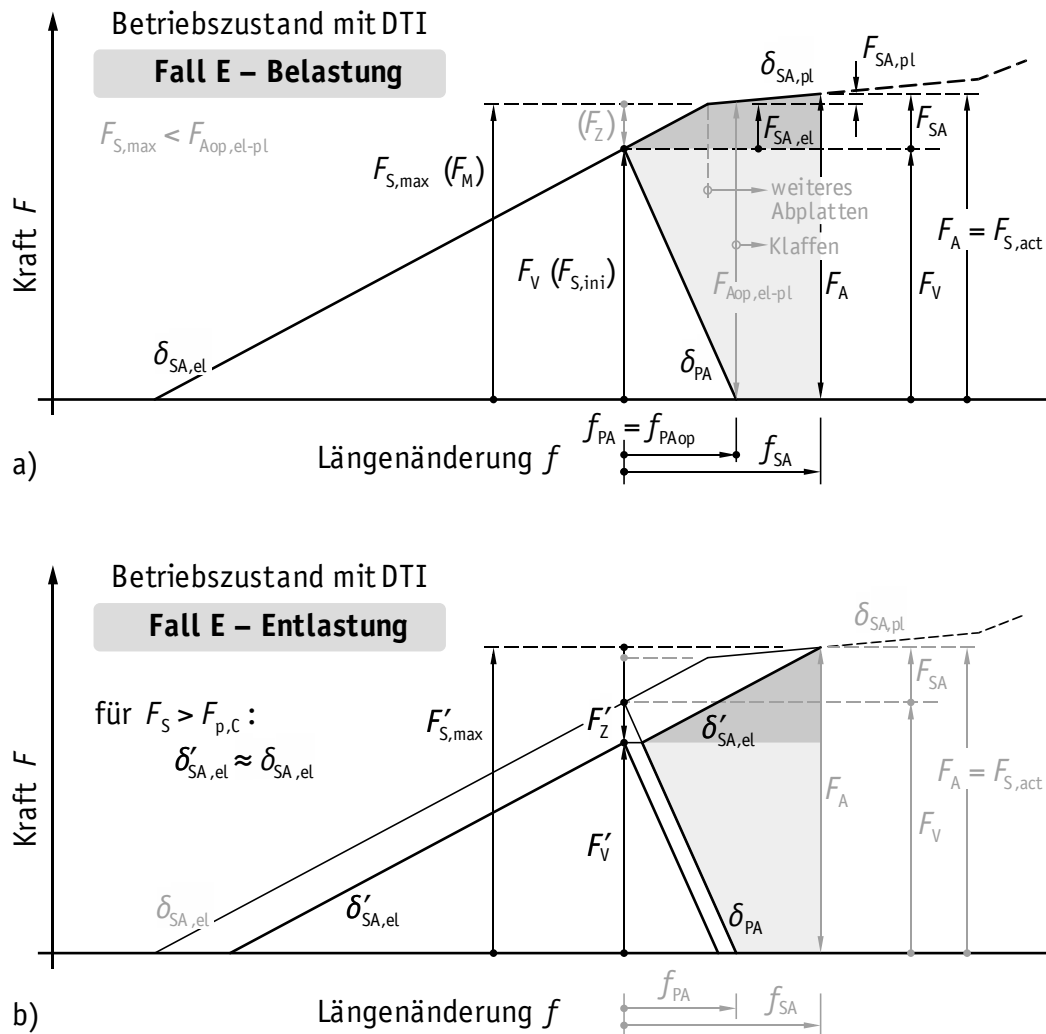
$$F_{S,act} = F_V + F_{SA} \quad (5.28)$$

Bei teilweiser oder vollständiger Entlastung von der Axialkraft  $F_A$  erfolgt die elastische Rückfederung der Schraubengarnitur zusammen mit den flachen Scheiben, dem DTI und anteilmäßig den Bauteilen, vgl. Tabelle 5.8, unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit  $\delta'_{SA,el}$ , siehe Bild 5.14 (b). Der Unterschied zur elastischen Nachgiebigkeit  $\delta_{SA,el}$  für die Belastung besteht durch die lastabhängige elastische Nachgiebigkeit  $\delta_{gap,el}$  des DTI mit Spalt, die durch die Steigerung der maximalen Drucklast bzw. Schraubenkraft verringert wird, vgl. Bild 5.6. Im Bereich ausreichend hoher Vorspannkraft oberhalb der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  ist der Unterschied vernachlässigbar.

Der zusätzliche Vorspannkraftverlust  $F'_Z$  sowie die Restvorspannkraft  $F'_V$  ergeben sich nach einem Lastwechsel mit vollständiger Entlastung entsprechend Tabelle 5.11. Für die *Fälle A* und *B* ohne erneutes plastisches Abplatten der Überstände sind keine Vorspannkraftverluste durch die Modellbildung vorgesehen.

Die Verspannungsschaubilder der einzelnen *Fälle A* bis *E* entsprechend Tabelle 5.10 sind in Anhang D.4 gegeben. Die Abgrenzung der einzelnen Fälle bzw. Abschnitte des Last-Verformung-Verhaltens kann mit Hilfe der Schraubenzusatzkräfte und Verformungen in Tabelle D.7 vollzogen werden.





**Bild 5.14.** Verspannungsschaubild für den Betriebszustand im Fall E: (a) Belastung mit Schraubenzusatzkraft  $F_{SA,r}$  (b) Entlastung mit Vorspannkraftverlust  $F'_Z$

**Figure 5.14.** Joint diagram in the working state in case E, (a) loading with additional bolt force  $F_{SA,r}$  (b) unloading with loss of preload  $F'_Z$

**Tabelle 5.9.** Axialkräfte an der Abhebegrenze bei zentrischer Belastung und Kraftverhältnisse für elastische und plastische Verformungen

**Table 5.9.** Axial loads at the opening limit during axial loading and load factors for elastic and plastic deformations

Verformung	(el.-)plastisch	elastisch und (el.-)plastisch	elastisch
Axialkraft an der Abhebegrenze	$F_{Aop,pl} = \frac{F_V}{1 - \Phi_{pl}}$	$F_{Aop,el-pl} = \frac{F_V + \Phi_{\Delta} \cdot (F_{S,max} - F_V)}{1 - \Phi_{pl}}$	$F_{Aop,el} = \frac{F_V}{1 - \Phi_{el}}$
	$F_{Aop,pl} \leq F_{Aop,el-pl} \leq F_{Aop,el}$		
Kraftverhältnis	$\Phi_{pl} = \frac{\delta_{pA}}{\delta_{SA,pl} + \delta_{pA}}$	$\Phi_{\Delta} = \frac{\delta_{SA,pl} - \delta_{SA,el}}{\delta_{SA,pl} + \delta_{pA}} = 1 - \frac{\Phi_{pl}}{\Phi_{el}}$	$\Phi_{el} = \frac{\delta_{pA}}{\delta_{SA,el} + \delta_{pA}}$

**Tabelle 5.10.** Axiale Schraubenzusatzkräfte und zugehörige Verformungen der Schraube mit DTI in unterschiedlichen Konstellationen

**Table 5.10.** Axial additional bolt loads and associated deformations of the bolt combined with the DTI in various constellations

Abgrenzung der Abschnitte		Axiale Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$	Fall
Vorbelastung	Abhebegrenze	Verlängerung $f_{SA}$ der Schraube mit DTI	
$\boxed{F_A} < \frac{F_{S,max} - F_V}{\Phi_{el}}$	$\boxed{F_A} \leq F_{Aop,el} \leq F_{S,max}$	$F_{SA} = \Phi_{el} \cdot F_A$ $f_{SA} = \Phi_{el} \cdot F_A \cdot \delta_{SA,el}$	<b>A</b>
	$F_{Aop,el} < \boxed{F_A} \leq F_{S,max}$	$F_{SA} = F_A - F_V$ $f_{SA} = (F_A - F_V) \cdot \delta_{SA,el}$	<b>B</b>
	$F_{Aop,el} \leq F_{S,max} < \boxed{F_A}$	$F_{SA} = F_A - F_V$ $f_{SA} = (F_{S,max} - F_V) \cdot \delta_{SA,el} + (F_A - F_{S,max}) \cdot \delta_{SA,pl}$	<b>C</b>
$\frac{F_{S,max} - F_V}{\Phi_{el}} \leq \boxed{F_A}$	$\boxed{F_A} \leq F_{Aop,el-pl}$	$F_{SA} = \Phi_{pl} \cdot F_A + \Phi_{\Delta} \cdot (F_{S,max} - F_V)$ $f_{SA} = \Phi_{pl} \cdot F_A \cdot \delta_{SA,pl} - \Phi_{\Delta} \cdot (F_{S,max} - F_V) \cdot \delta_{pA}$	<b>D</b>
	$F_{Aop,el-pl} < \boxed{F_A}$	$F_{SA} = F_A - F_V$ $f_{SA} = (F_{S,max} - F_V) \cdot \delta_{SA,el} + (F_A - F_{S,max}) \cdot \delta_{SA,pl}$	<b>E</b>
<b>Trennfuge</b>		<b>Schraubenkraft</b>	<b>Verformung</b>
überdrückt		unterhalb abs. Maximum	elastisch
klaffend		über abs. Maximum	(el.-)plastisch

**Tabelle 5.11.** *Zusätzliche Vorspannkraftverluste und Restvorspannkraft unter Verwendung eines DTI in unterschiedlichen Konstellationen***Table 5.11.** *Additional losses of preload and residual preloads using a DTI in various constellations*

Fall	Vorspannkraftverlust $F'_Z$	Restvorspannkraft $F'_V$
<b>A</b>	$F'_Z = 0$	$F'_V = F_V$
<b>B</b>	$F'_Z = 0$	$F'_V = F_V$
<b>C</b>	$F'_Z = F_V - F'_V$	$F'_V = (1 - \Phi'_{el}) \cdot \left( F_A - \frac{f_{SA} - f_{PA}}{\delta'_{SA,el}} \right)$ mit $f_{PA} = F_V \cdot \delta_{PA}$
<b>D</b>	$F'_Z = F_A \cdot \Phi'_{el} - F_{SA}$	$F'_V = F_V - F'_Z$
<b>E</b>	$F'_Z = F_V - F'_V$	$F'_V = (1 - \Phi'_{el}) \cdot \left( F_A - \frac{f_{SA} - f_{PA}}{\delta'_{SA,el}} \right)$ mit $f_{PA} = F_V \cdot \delta_{PA}$

## 5.5 Anwendung des Modells auf die Bauteil-Zugversuche

Das Modell der Schraubenverbindung mit DTI auf Grundlage des Verspannungsschaubildes wird auf die vorliegenden Bauteil-Zugversuche angewendet. Dazu wurden die Nachgiebigkeiten der Schraubengarnitur, der Scheiben und des direkten Kraftanzeigers sowie der Bauteile bestimmt. Der Krafteinleitungsfaktor wurde auf Grundlage der VDI 2230-1 mit zwei verschiedenen Näherungen ermittelt. Die Auswirkungen können so direkt anhand der Berechnungsergebnisse beurteilt werden.

Aus den Zugversuchen sind die einwirkenden Axialkräfte  $F_A$  in ihrer Größe und Reihenfolge bekannt, so dass damit die Berechnung der auftretenden Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$ , der Schraubenkraft  $F_S$ , der Verformung  $f_{SA}$ , des Vorspannkraftverlustes  $F'_Z$  und der Restvorspannkraft  $F'_V$  für einen Lastwechsel durchgeführt werden kann. Die Gegenüberstellung der Messergebnisse der Versuche und der Berechnungsergebnisse des Modells ermöglicht unter Berücksichtigung der aufeinander folgenden Lastwechsel die Beurteilung der Güte des Modells sowie des Potentials für mögliche Anpassungen und Verbesserungen.

Die Darstellung der Versuchsergebnisse der Bauteil-Zugversuche aus Kapitel 4.5.4.5 wird zunächst zum Vergleich mit den Berechnungsergebnissen aus dem Modell aufgegriffen. Bild 5.15 zeigt den Einfluss der einwirkenden Axialkraft auf

den Erhalt der Vorspannkraft. Die exemplarische Auswahl der Prüfungen entspricht Bild 4.53.

Um die Modellbildung für die Verbindung mit direktem Kraftanzeiger umfassend beurteilen zu können, wurden die Bauteil-Zugversuche über die entsprechend Kapitel 4.5 größte Axialkraft  $F_A = F_{t,Rd}$  hinaus mit weiterer Laststeigerung fortgesetzt. Für den baupraktisch relevanten Einsatz hat dies geringe Bedeutung. Die Darstellung der Ergebnisse in Kapitel 4.5 wurde daher auf eine größte Beanspruchung von  $F_A = F_{t,Rd}$  begrenzt. Die ermittelten Kurven sind bis zum Erreichen von  $F_A = F_{t,Rd}$  mit Volllinien, für größere Axialkräfte mit Strichlinien dargestellt, siehe Bild 5.15. Die Erläuterungen zum Vergleich von Versuch und Modell für die ausgewählten Prüfungen sind in Tabelle 5.12 zusammengestellt.

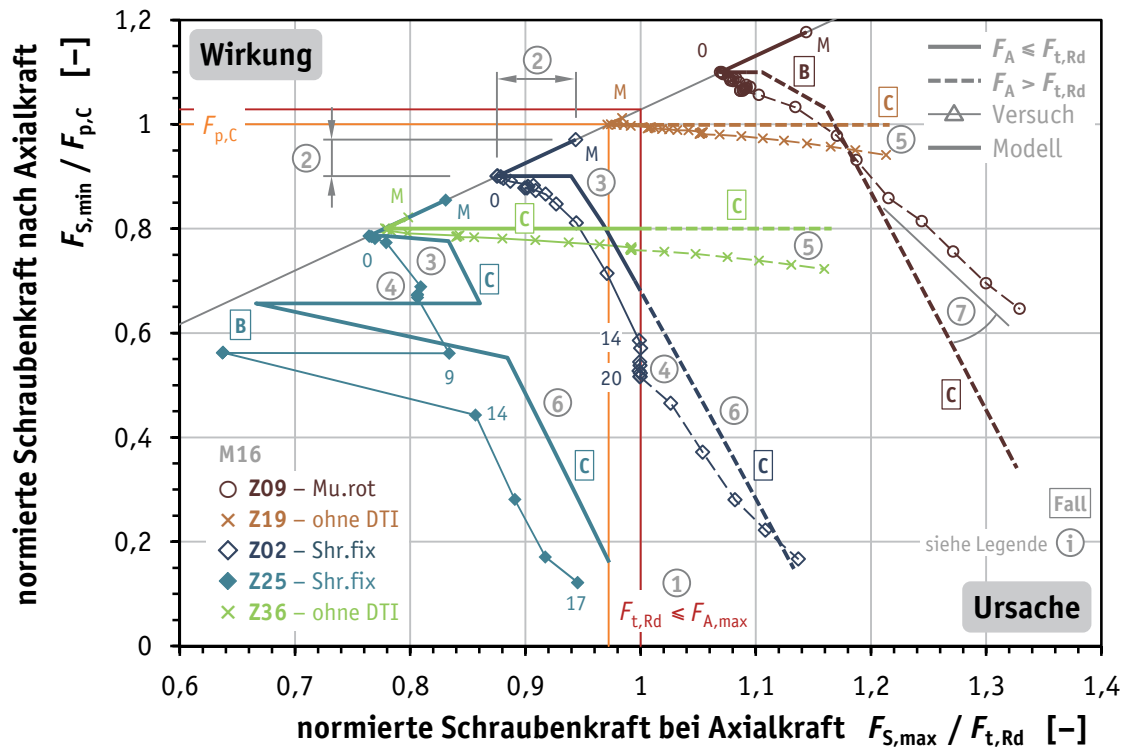
Die Berechnungsergebnisse des Modells bestehen im Wesentlichen aus der Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$  unter einer Axialkraft und der Restvorspannkraft  $F'_V$  nach dem entsprechenden Lastwechsel. Die Äquivalenz der Kenngrößen von Versuch und Modell wird durch folgende Gleichungen ausgedrückt:

$$F_{SA} = F_{S,max} - F_V \quad (5.29)$$

$$F'_V = F_{S,min} = F_V - F'_Z \quad (5.30)$$

Beide Ergebnisse sind über die Vorspannkraft  $F_V$  zu Beginn eines Lastwechsels miteinander verknüpft. Die Berechnungsergebnisse sind im Vergleich zu den Versuchsergebnissen ausgewählter Prüfungen in Bild 5.16 dargestellt. Es zeigt die vollständigen Ergebnisse unter einer größten Beanspruchung von  $F_A = F_{t,Rd}$ . Die Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$  und die Restvorspannkraft  $F_{S,min} = F'_V$  sind normiert bezüglich der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  aufgetragen.

Es wird deutlich, dass eine Beurteilung der Kurvenverläufe durch zwischenzeitliche Lastwechsel geringerer als der zuvor erreichten maximalen Amplitude der Axialkraft  $F_A$  erschwert ist. Es besteht außerdem bereits entsprechend Bild 5.15 die Erkenntnis, dass Lastwechsel identischer Größe im Versuch zu Vorspannkraftverlusten führen, im Modell dieses Verhalten jedoch nicht berücksichtigt ist. Daher werden die Darstellungen im normierten Axialkraft-Schraubenkraft-Diagramm um die entsprechenden Lastwechsel reduziert. Es ergeben sich daraus Kurven mit stetig ansteigender Axialkraft und entsprechend abhängig anwachsenden Vorspannkraftverlusten bzw. abnehmenden Restvorspannkraften, siehe Bild 5.17.



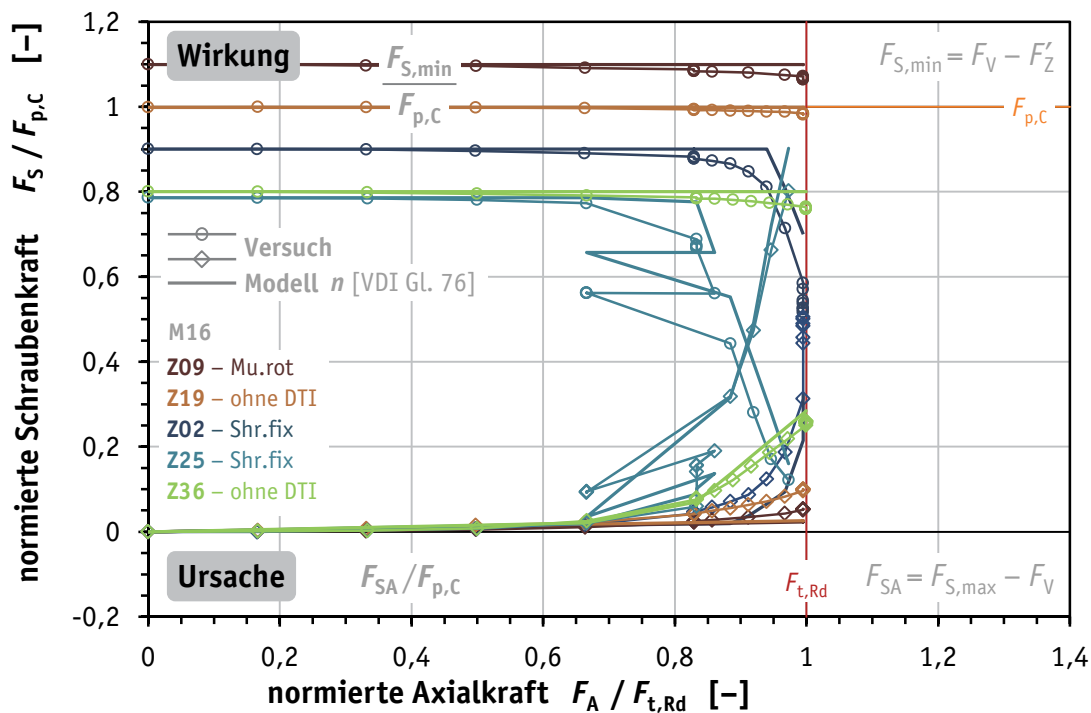
**Bild 5.15.** Einfluss von Axialkräften auf den Erhalt der Vorspannkraft – Vergleich von Versuch und Modell anhand ausgewählter Prüfungen entsprechend Bild 4.53

**Figure 5.15.** Effect of axial loads on the preservation of the preload – comparison of test and analytical model for selected tests according to Figure 4.53

**Tabelle 5.12.** Erläuterungen und Legende zu Bild 5.15

**Table 5.12.** Explanations and key to Figure 5.15

- |   |  |
|---|--|
| 1 | Bis zu einer maximalen Axialkraft von $F_A = F_{t,Rd}$ sind die Ergebnisse von Versuch und Modell mit Volllinien dargestellt, darüber hinaus mit Strichlinien.   |
| 2 | Montagevorspannkraft $F_M$ und Vorspannkraft $F_{S,ini}$ bei Beginn des Zugversuchs als Eingangswerte für das Modell übernommen.   |
| 3 | Zusätzliche Vorspannkraftverluste im Modell erst mit Überschreiten der zuvor maximal erreichten Schraubenkraft zu verzeichnen ( $F_S > F_{S,max} (F_M)$ ).   |
| 4 | Bei Wiederholung identischer Lastwechsel (auch mit klaffender Trennfuge) im Modell keine Vorspannkraftverluste zu verzeichnen.   |
| 5 | Vorspannkraftverluste für Verbindungen ohne DTI nicht im Modell enthalten.   |
| 6 | Der Gradient der Kurve, d. h. die Entwicklung der Vorspannkraftverluste im Modell, stimmt gut mit den Ergebnissen der Versuche überein. Es handelt sich um Verbindungen mit dem DTI unter dem fixierten Schraubenkopf (Shr.fix). |
| 7 | Verbindungen mit dem DTI unter der rotierten Mutter (Mu.rot) weisen unterschiedliche Gradienten für Modell und Versuch auf. Die im Modell ermittelten Vorspannkraftverluste sind größer (sichere Seite).                         |



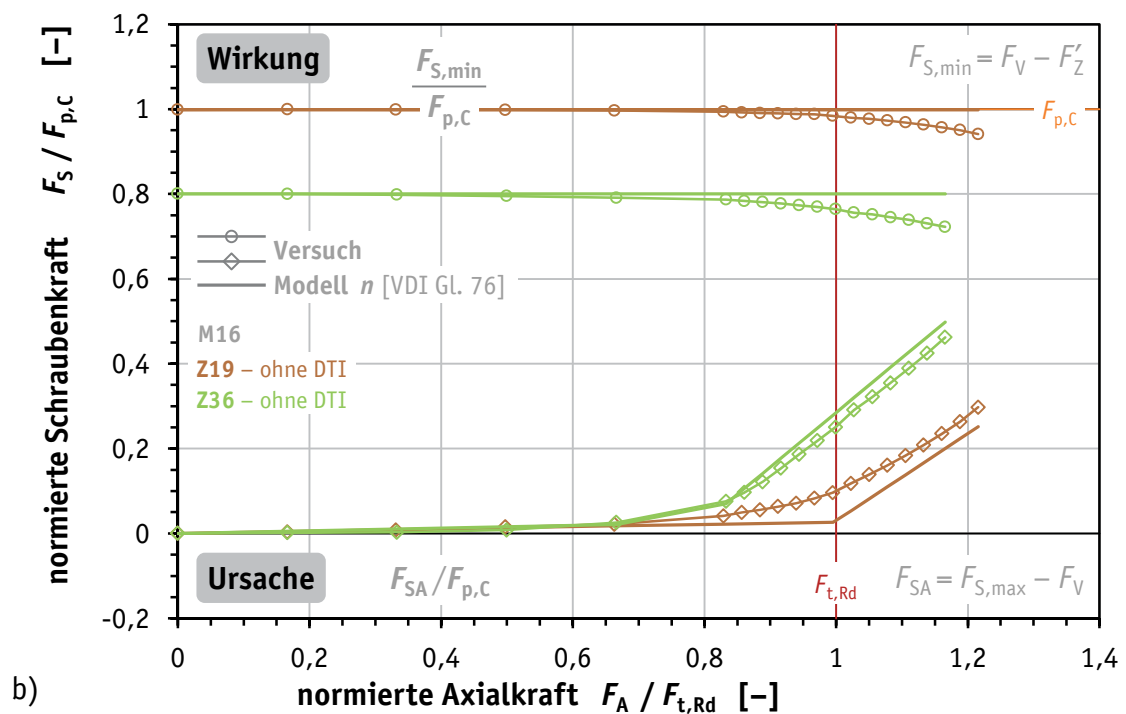
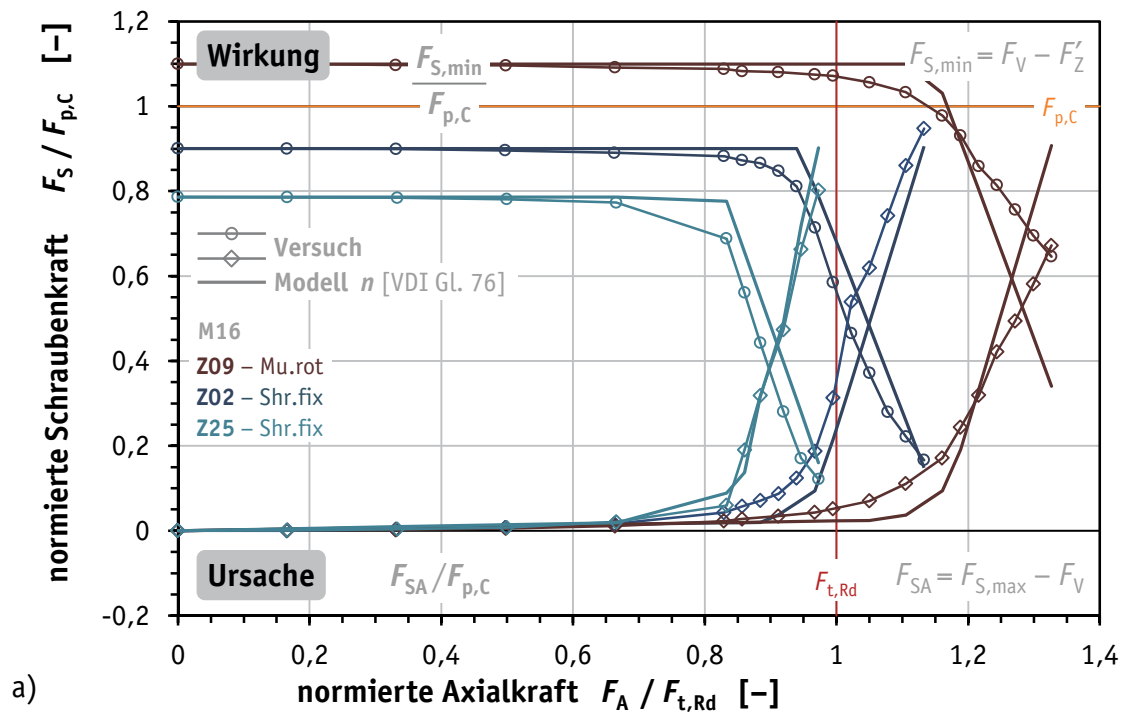
**Bild 5.16.** Normiertes Axialkraft-Schraubenkraft-Diagramm aus Versuch und Modell für ausgewählte Prüfungen entsprechend Bild 4.53, maximale Axialkraft  $F_A \leq F_{t,Rd}$

**Figure 5.16.** Normalized axial load-bolt load-diagram from test and analytical model for selected tests based on Figure 4.53, maximum axial loads  $F_A \leq F_{t,Rd}$

Der Vergleich zwischen den Versuchs- und Berechnungsergebnissen ist für jeden Bauteil-Zugversuch individuell in Anhang D.6 in Form der Axialkraft-Schraubenkraft-Diagramme gegeben. Bild 5.18 zeigt exemplarisch den Bauteil-Zugversuch Z02. Für die Berechnungsergebnisse des Modells sind die drei unterschiedlichen Annahmen für den Krafteinleitungsfaktor  $n$  separat dargestellt. Die beiden entsprechend Kapitel 5.3 nach VDI 2230-1 berechneten Krafteinleitungsfaktoren werden durch einen dritten, entsprechend [IE01] ingenieurmäßig abgeschätzten Krafteinleitungsfaktor ergänzt. Die Ermittlung ist in Bild D.1 und Tabelle D.6 dargestellt.

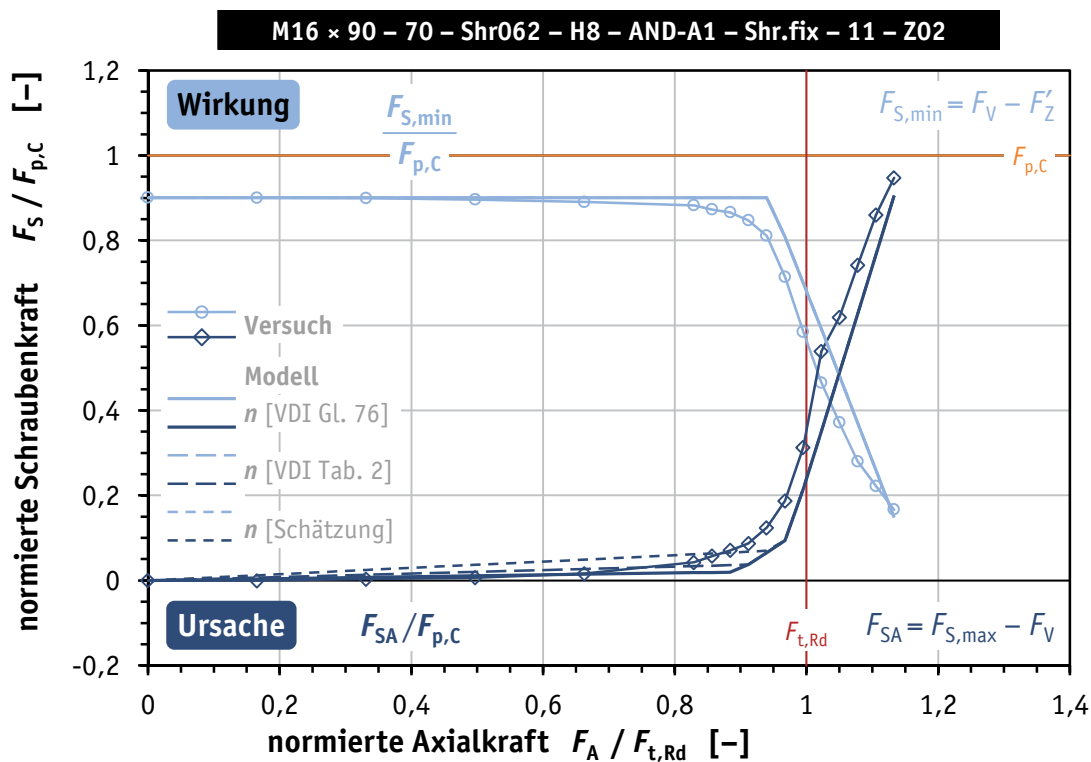
Es ist ersichtlich, dass mit zunehmend größerem Krafteinleitungsfaktor auch die Schraubenzusatzkraft im Bereich mit überdrückter Trennfuge steigt. Für den Nachweis ermüdungswirksamer Beanspruchungen mit Hilfe der Schraubenzusatzkraft liegt der Ansatz eines hohen Wertes für den Krafteinleitungsfaktor auf der sicheren Seite. Im Bereich einer klaffenden Trennfuge ist der Krafteinleitungsfaktor ohne Bedeutung. Auswirkungen des Krafteinleitungsfaktors auf die Restvorspannkraft sind nicht zu erkennen.





**Bild 5.17.** Normierte Axialkraft-Schraubenkraft-Diagramme aus Versuch und Modell für ausgewählte Prüfungen in Anlehnung an Bild 4.53 und Bild 5.16: (a) Prüfungen mit DTI, (b) Prüfungen ohne DTI

**Figure 5.17.** Normalized axial load-bolt load-diagrams from test and analytical model for selected tests based on Figure 4.53 and Figure 5.16: (a) tests with DTI, (b) tests without DTI



**Bild 5.18.** Normiertes Axialkraft-Schraubenkraft-Diagramm aus Versuch und Modell für Bauteil-Zugversuch Nr. Z02 (mit DTI)

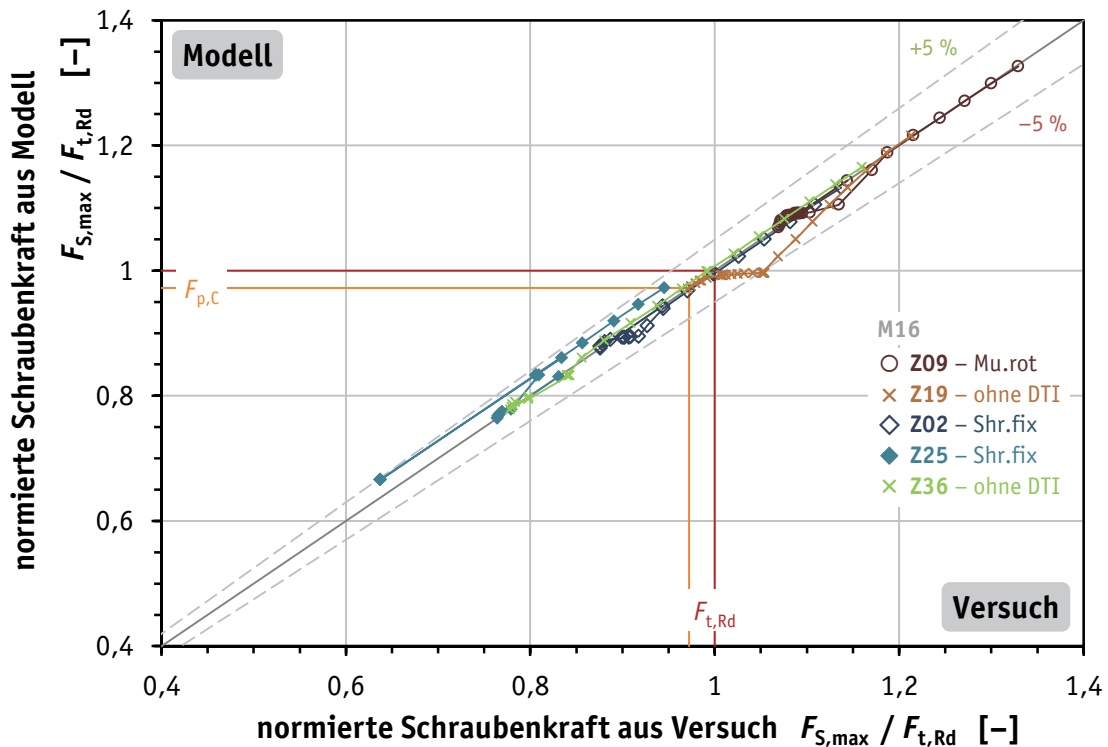
**Figure 5.18.** Normalized axial load-bolt load-diagram from test and analytical model for component tensile test No. Z02 (including DTI)

## 5.6 Beurteilung der Ergebnisse des Berechnungsmodells

Die Güte der Ergebnisse des Berechnungsmodells wird anhand der vorliegenden Messergebnisse der Versuche vergleichend mit Hilfe der nachfolgenden Streudiagramme beurteilt.

Bild 5.19 zeigt das Streudiagramm der maximalen Schraubenkräfte  $F_{S,max}$ , die bei einwirkender Axialkraft entstehen. Für die ausgewählten Prüfungen ist eine gute Übereinstimmung mit Schwankungen um  $\pm 5\%$  ersichtlich. Die ausgeprägte Unterschreitung der Schraubenkraft durch die Modellberechnung für Versuch Z19 liegt im Übergangsbereich von der überdrückten zur klaffenden Trennfuge vor. Entsprechend Bild 5.17 (b) ist ersichtlich, dass der nicht stetige, abknickende Kurvenverlauf des Modells den ausgeprägt bogenförmigen Verlauf der Messergebnisse am Knickpunkt besonders unterschätzt. Daraus resultieren im Modell zu geringe Schraubenkräfte und Schraubenzusatzkräfte.

Für die Bereiche der überdrückten Trennfuge und der ausgeprägt klaffenden Trennfuge sind die Streuungen vor allem durch die festgestellten Messungenauigkeiten der Versuchsergebnisse gegeben. Entsprechend Kapitel 4.6 wurde diese Abweichung zwischen der einwirkenden Axialkraft und der Schraubenkraft bei



**Bild 5.19.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte aus Versuch und Modell für ausgewählte Prüfungen entsprechend Bild 4.53: maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

**Figure 5.19.** Scatterplot of the normalised bolt loads from test and analytical model for selected tests according to Figure 4.53: maximum bolt load  $F_{S,max}$

klaffender Trennfuge festgestellt. Es ist davon auszugehen, dass die Abweichungen auch für die Schraubenkraft bei überdrückter Trennfuge vorhanden sind. Dort ist der Einfluss allerdings mindestens für den ersten Lastwechsel eliminiert, indem die Vorspannkraft  $F_{S,ini}$  vor Beginn der Beanspruchung aus den Messergebnissen übernommen wurde, einschließlich der möglichen Abweichung.

Die Streudiagramme für die maximale Schraubenkraft aller Versuche sind in Anhang D.7 zusammengefasst. Ebenso erfolgt dort die Darstellung für die einzelnen Serien, aus denen Bild 5.19 einzelne Versuche exemplarisch zeigt.

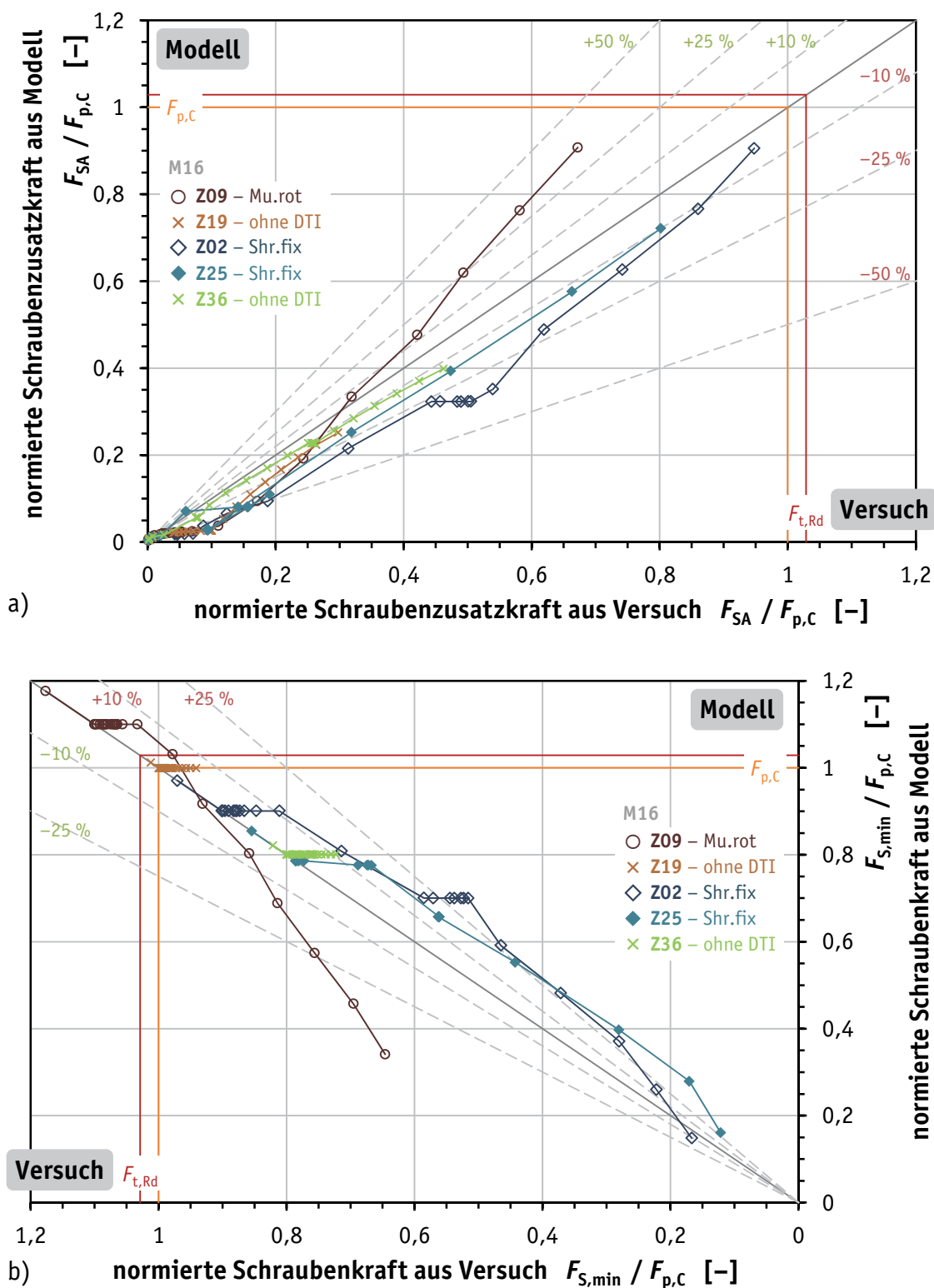
Die Streudiagramme für die Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$  und die Restvorspannkraft  $F_{S,min}$  sind in Bild 5.20 dargestellt. Die Abhängigkeit beider Größen ist durch die Gleichungen (5.29), (5.30) sowie entsprechend Tabelle 5.10 und Tabelle 5.11 gegeben. So hängen für einen betrachteten Lastwechsel beide Größen von der vorhandenen Vorspannkraft  $F_V$  ab. Eine Unterschätzung der Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$  durch das Modell entsprechend Bild 5.20 (a) resultiert in einer Überschätzung der Restvorspannkraft  $F_{S,min}$  entsprechend Bild 5.20 (b) und umgekehrt.

Die Streudiagramme von Versuch und Modell sind für sämtliche Serien in Anhang D.7 dargestellt. Folgende Beobachtungen aus den Versuchen wurden in der Modellbildung nicht berücksichtigt und führen dementsprechend zur vorhandenen Unschärfe des Modells bei der Beschreibung der vorliegenden Versuche:

- a) Vorspannkraftverluste, verursacht durch die Schraubengarnitur oder Bauteile infolge von Lastwechseln, sichtbar bei den Verbindungen ohne DTI, siehe Bild 5.17 (b), Bild 5.15 und Tabelle 5.12 (5),
- b) Vorspannkraftverluste in Verbindungen mit DTI, die bei Schraubenkräften unterhalb der zuvor maximal eingeleiteten Schraubenkraft entstehen, siehe Bild 5.15 und Tabelle 5.12 (3),
- c) Vorspannkraftverluste infolge von identischen Lastwechseln, die die maximale Schraubenkraft nicht weiter vergrößern, siehe Bild 5.16, Bild 5.15 und Tabelle 5.12 (4),
- d) der bogenförmige und nicht unstetig abknickende Übergang von überdrückter zu klaffender Trennfuge mit progressiv zunehmenden Schrauben-zusatzkräften infolge der gegebenen Versuchsbedingungen, siehe Bild 5.17,
- e) die größere Abplattung der Überstände des DTI durch tangentiales Abreiben bzw. Umformen der Überstände bei Verwendung unter der rotierten Komponente der Garnitur im Vergleich zur Verwendung unter der fixierten Komponente oder dem Drucklastversuch.

Es ist festzuhalten, dass sich die Abweichungen der Vorspannkraft zwischen Versuch und Modell im Zuge der Betrachtung von aufeinanderfolgenden Lastwechseln fortpflanzen. Daher ist die vielfach festgestellte gute Übereinstimmung der Gradienten in den Kurven von Versuch und Modell entsprechend Bild 5.17 und Bild 5.18 nicht in den Streudiagrammen als solche ablesbar und nicht durch eine Lage nahe der Winkelhalbierenden als mögliches Optimum gewürdigt.

Unter Vernachlässigung dieser Effekte lässt sich mit dem vorhandenen Modell das Last-Verformung-Verhalten des DTI in der vorgespannten Verbindung in ausreichender Näherung beschreiben. Es muss beachtet werden, dass für die Beurteilung der Vorspannkraft und der Vorspannkraftverluste der gesamten Verbindung zusätzliche ungünstige Effekte vorhanden sind, die durch eine Vergrößerung der abgeschätzten Vorspannkraftverluste berücksichtigt werden müssen.



**Bild 5.20.** Streudiagramme der normierten Schraubenkräfte aus Versuch und Modell für ausgewählte Prüfungen entsprechend Bild 4.53: (a) Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$ , (b) minimale Schraubenkraft  $F_{S,min}$

**Figure 5.20.** Scatterplots of the normalised bolt loads from test and analytical model for selected tests according to Figure 4.53: (a) additional bolt load  $F_{SA}$ , (b) minimum bolt load  $F_{S,min}$

## 5.7 Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des Modells

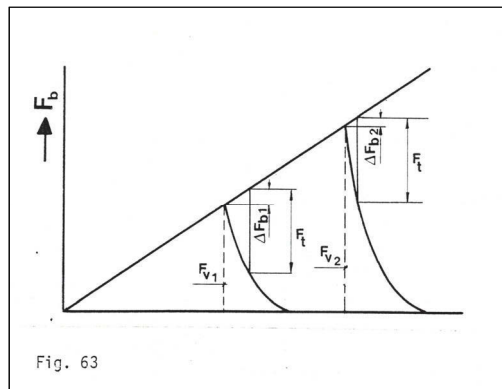
Möglichkeiten zur Verbesserung der Modellaussage gegenüber den experimentellen Ergebnissen bestehen insbesondere in den vorgenannten Punkten (a) bis (e). Da sich für die beobachteten Vorspannkraftverluste in den Punkten (a), (b) und (c) eine Vielzahl von möglichen Einflussparametern – z. B. Lastamplitude, Lastniveau, Lastwechselzahl, Kollektivform etc. – finden lassen und dementsprechende experimentelle Untersuchungen erforderlich sind, ist eine vorrangige Berücksichtigung und Untersuchung nicht möglich.

Sofern für gleichartige Verbindungen entsprechende Vorspannkraftverluste bekannt sind oder abschätzbar werden, sind diese dem Berechnungsergebnis hinzuzufügen. Ob dies additiv erfolgen kann, oder die entsprechenden Vorspannkraftverluste als Eingangsparameter in die Modellberechnung eingehen sollten, ist zu klären.

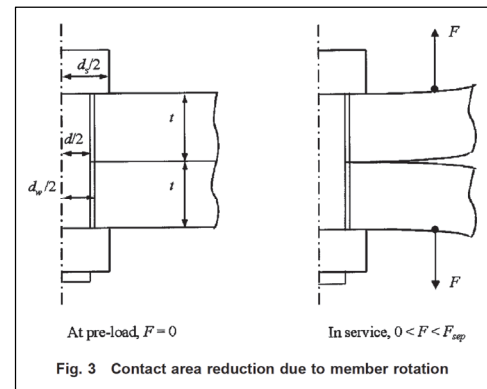
Der nichtlineare stetige Übergang zwischen der überdrückten und der klaffenden Trennfuge entsprechend Punkt (d) ist insbesondere für exzentrisch beanspruchte Verbindungen eine zentrale Fragestellung der Modellierung und Berechnung, derer sich eine Vielzahl von Untersuchungen gewidmet haben, vgl. exemplarisch [LS11], [Ja03], [Se01], [Le00], [Pe98], [SN97] sowie VDI 2230-1.

Für die zentrisch beanspruchte Verbindung ist die Anzahl möglicher Parameter zwar reduziert, die analytische Abbildung und Korrelation zu Experimenten bleibt allerdings komplex. So berichtet BOUWMAN [Bo79] im Rahmen experimenteller Untersuchungen über die nichtlineare Übergangsfunktion zum Klaffen der zentrisch beanspruchten Verbindung, siehe Bild 5.21 (a). Ebenso beschreibt [IE01] die Mechanismen, die zu anwachsenden Schraubenzusatzkräften bei sinkendem Vorspannkraftniveau führen. Die Beschreibung einer axialsymmetrischen Biegeverformung des Vorspannkörpers mit analytischen Methoden wurde in [ZP04] vorgenommen, siehe Bild 5.21 (b). Für eine fortgehende Betrachtung kann zunächst an diese und die Untersuchungen in [Zh05] und [YNW12] angeknüpft werden.

Der nichtlineare stetige Übergang zum Klaffen kann ebenso mit numerischen Methoden, z. B. der Finite-Elemente-Methode (FEM), analysiert werden. Um das Tragverhalten der gesamten Verbindung einschließlich direktem Kraftanzeiger schlussendlich abzubilden, muss ebenso die Beschreibung des direkten Kraftanzeigers aus experimentellen Untersuchungen abgeleitet werden; mit denselben Problemen, die zuvor erläutert wurden. Dass eine Annäherung der numerisch



a)



b)

**Bild 5.21.** Nichtlineares Last-Verformung-Verhalten unter zentrischer Axialkraft, Verspannungsschaubild nach [Bo79] (a), Verformung der Bauteile nach [ZP04] (b)

**Figure 5.21.** Nonlinear load-deformation-behaviour under concentric axial load, joint diagram according to [Bo79] (a), deformations of components [ZP04] (b)

ermittelten Last-Verformung-Kurve an die experimentell ermittelte Kurve des Drucklastversuchs möglich ist, zeigte HANSEN [Ha11] anhand eines Beispiels.

Aufgrund unbekannter werkstofflicher Eigenschaften und der nötigen Annahmen kann letztendlich auf die geometrisch exakte Modellierung des direkten Kraftanzeigers verzichtet werden. Ob eine einfache Scheibe mit homogenen und justierten elastisch-plastischen Eigenschaften das Last-Verformung-Verhalten adäquat annähern kann, ist weiterhin zu untersuchen.

Ohne iterative Justierung wird sich die Abweichung unter Punkt (e) auch für ein FEM-Modell nicht beseitigen lassen. Dazu sind die Einflüsse auf den Abtrag der Überstände durch Drehung der Scheibe zu vielfältig. Für die Berücksichtigung im Berechnungsmodell bietet sich für einen nachfolgenden Schritt die Beschreibung der Last-Verformung-Kurve für den DTI aus den mit Fühllehren bestimmten Verformungen in einer multi-linearen Funktion, anstelle der Ableitung einer bilinearen Funktion aus den Drucklastversuchen im Übergang zum Abplatten der Überstände an.

Entsprechende Anstrengungen zur Verbesserung des Modells in Punkt (e) sind allerdings nicht zwingend notwendig, da die ermittelten Vorspannkraftverluste tendenziell auf der sicheren Seite liegen, siehe Bilder 5.15 und 5.20 (b).

## 5.8 Fallbeispiele

### 5.8.1 Allgemeines

Für die vorliegenden direkten Kraftanzeiger sind aufgrund der durchgeführten Modellbildung Berechnungen der Schraubenzusatzkräfte und der Vorspannkraftverluste für unterschiedliche Klemmlängen möglich, die nicht experimentell untersucht wurden. Außerdem lässt sich bei vorgegebenem DTI die Art der Schraubengarnitur variieren. Die nachfolgenden Fallbeispiele zeigen den Einfluss

- des direkten Kraftanzeigers,
- des Krafteinleitungsfaktors  $n$ ,
- der Montagevorspannkraft  $F_M$   
mit und ohne anfänglichem Vorspannkraftverlust und
- der Art der Schraubengarnitur

auf den Vorspannkraftverlust bei einem einzelnen Lastwechsel (LW) mit der maximal zulässigen Axialkraft  $F_A = F_{t,Rd}$ . Sämtliche Einflussgrößen auf einen Vorspannkraftverlust aus dem abgebildeten Verhalten des DTI sind in den Bildern 5.22, 5.23 und 5.24 zusammengefasst.

#### Art der Schraubengarnitur

Direkte Kraftanzeiger sind innerhalb der Produktnormenreihe EN 14399 mit unterschiedlichen Schraubengarnituren kombinierbar. Die traditionell in Großbritannien verbreitete Anwendung mit HR-Garnituren der Festigkeitsklasse 8.8, vgl. [SCI09] und [BCSA10b], wird so um die Varianten mit HR- und HV-Garnituren der Festigkeitsklasse 10.9 erweitert.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Systemen HR und HV besteht in der größeren Gewindelänge der HR-Garnitur, die damit bei identischer Nennlänge über einen kürzeren Schaft im Vergleich zur HV-Garnitur verfügt. Da die freie belastete Gewindelänge ebenso größer ist, nämlich mindestens 4 im Gegensatz zu 2 vollständigen Gewindegängen, ist die elastische Nachgiebigkeit der HR-Schraube infolge der größeren Gewindelänge ebenso größer.

Das zweite Unterscheidungsmerkmal ist die Höhe der Sechskantmutter. Da keine Untersuchungen über die Nachgiebigkeiten von gepaartem Gewinde und Sechskantmutter im Vergleich der Systeme HR und HV vorliegen, wird für die Bestimmung der Nachgiebigkeit VDI 2230-1 angewendet, in dem lediglich der Nenndurchmesser Verwendung findet, siehe Kapitel 5.2.2. Mit zunehmender Klemmlänge wird der Einfluss aus dieser Vereinfachung geringer.



STEURER [St96], [St99] hat in seinen Untersuchungen zum Tragverhalten von geschraubten Stirnplattenverbindungen eine HV-Schraube mit Gewinde bis zum Kopf einbezogen, deren Verformungsvermögen aufgrund der größeren Dehnlänge des durchgehenden Gewindes vergrößert ist. Diese Schrauben werden dort als HVN-Schrauben bezeichnet. Sie werden hier als logische Fortführung der Verminderung der Steifigkeit bzw. Vergrößerung der Nachgiebigkeit von HV- zu HR-Garnituren einbezogen und weiterhin als HVN-Schraube bzw. -Garnitur bezeichnet. Auch ohne die derzeitige Berücksichtigung in EN 14399 ist eine zukünftige Verwendung nicht ausgeschlossen.

Der Bedarf an Schrauben mit größerer Gewindelänge zeigt sich insbesondere an den Garnituren großer Abmessungen entsprechend DASt-Richtlinie 021, die vielfach mit größerer Gewindelänge – als in tabellierter Form enthalten – bestellt und verwendet werden. Sie tragen weiterhin die Kennzeichnung HV und sind mit der entsprechenden Mutter geringerer Höhe ausgestattet. Die kurze Gewindelänge entfällt allerdings als Merkmal der HV-Garnitur.

Die Art der Schraubengarnitur wird nachfolgend durch Voll- und Strichlinien innerhalb einzelner Diagramme unterschieden, siehe exemplarisch Bild 5.22 (a). Es werden die Nennlängen der Schrauben nach EN 14399-3 und -4 einbezogen. Ausgehend von den mittleren Klemmlängen für HV-Garnituren nach EN 14399-4, Tabelle A.1 werden vergleichbare Klemmlängen für die HR- und HVN-Garnituren berücksichtigt. Die darüber hinausgehende Berücksichtigung weiterer kleinerer Klemmlängen für HR- und HVN-Garnituren ist nicht erforderlich, da damit das Verformungsverhalten einer entsprechend kürzeren HV-Garnitur abgebildet würde.

### Montagevorspannkraft und Vorspannkraftverluste

Die experimentellen Untersuchungen haben unter Anwendung des direkten Kraftanzeigers unterschiedlich hohe Montagevorspannkraften hervorgebracht. Dabei wurde deutlich, dass zu geringe Montagevorspannkraften hohe Vorspannkraftverluste im Betriebszustand zur Folge haben können. Es werden daher Montagevorspannkraften  $F_M$  zwischen  $0,95 F_{p,C}$  und  $1,2 F_{p,C}$  für die Fallbeispiele berücksichtigt, siehe exemplarisch Bild 5.22 (a). Dabei stellt die Berechnung eines Lastwechsels mit der Axialkraft  $F_A = F_{t,Rd}$  unter Berücksichtigung der vollen Montagevorspannkraft  $F_M = F_{S,ini} = F_{p,C}$  den theoretischen Referenzfall dar.

Es ist ausgeschlossen, dass keine Vorspannkraftverluste durch Setzen nach Abschluss der Montage auftreten. Dies zeigten zum einen die Versuche entsprechend

Kapitel 4.5.4.4. Zum anderen kommen weitere ungünstige Montagebedingungen, z. B. Beschichtungen, in der Praxis hinzu, die zur Vergrößerung der Verluste beitragen können. Daher werden die ausgewählten Laststufen um einen anfänglichen Vorspannkraftverlust  $F_Z$  erweitert, der jeweils  $0,1 F_{p,c}$  beträgt, siehe exemplarisch Bild 5.22 (b). Die Montagevorspannkraft  $F_M$  beträgt beispielsweise  $0,95 F_{p,c}$ , die Vorspannkraft  $F_{S,ini}$  vor Betriebsbelastung nur noch  $0,85 F_{p,c}$ .

### Krafteinleitungsfaktor

Der Krafteinleitungsfaktor  $n$  kann mit unterschiedlicher Schärfe bestimmt bzw. abgeschätzt werden, vgl. Kapitel 5.3. Je größer der Krafteinleitungsfaktor ist, umso größer sind die auftretenden Schraubenzusatzkräfte  $F_{SA}$ , vgl. z. B. Bild 5.18. Diese verursachen gegebenenfalls Vorspannkraftverluste. Auf der sicheren Seite lassen sich die Schraubenzusatzkräfte  $F_{SA}$  und resultierenden Vorspannkraftverluste  $F'_Z$  mit einem Krafteinleitungsfaktor von  $n=1$  erfassen.

Die Annahme einer direkten Lasteinleitung unter Schraubenkopf und Mutter bleibt allerdings Theorie. Für unbekannte aber praxisrelevante Konfigurationen wird entsprechend [IE01] der Krafteinleitungsfaktor mit  $n=0,5$  abgeschätzt und angesetzt. Für die durchgeführten Versuche liegt dieser im Bereich der aufwändig nach VDI 2230-1 ermittelten Faktoren, siehe Tabelle 5.7.

Die Modellberechnungen mit einem Krafteinleitungsfaktor von  $n=1$  sind in den nachfolgenden Bildern unter (a) und (b) dargestellt, diejenigen mit  $n=0,5$  unter (c) und (d), siehe exemplarisch Bild 5.22.

### Direkte Kraftanzeiger – Durchmesser, Hersteller, Los

Die folgenden Modellberechnungen sind ausschließlich für die betrachteten direkten Kraftanzeiger gültig, deren Last-Verformung-Verhalten für die Modellbildung aus den Drucklastversuchen abgeleitet ist. Solange keine vergleichbaren Ergebnisse aus Drucklastversuchen vorliegen, ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse der Modellberechnungen nur für die vorliegenden Kombinationen von Nenndurchmesser, Hersteller und Los Gültigkeit haben. Bild 5.22 zeigt die Klemmlängen-Vorspannkraftverlust-Diagramme für die Serie M16–H10–TS-A11, Bild 5.23 für die Serie M20–H10–TS-22A und Bild 5.24 für die Serien M16–H8–AND-A1 sowie M20–H8–AND-A2.

## Abmessungen der Bauteile

Für die Modellberechnungen werden die Abmessungen der Bauteile aus den Bauteil-Zugversuchen übernommen. Mit variierender Schraubenlänge wird die Paketdicke bzw. die Dicke der Bauteile entsprechend angepasst, ohne den Außendurchmesser zu verändern. Daraus ergeben sich für unterschiedliche Schraubenlängen und -durchmesser im Vorspannkörper zwei „Verformungskegel“ mit oder ohne zwischenliegender „Verformungshülse“.

Eine Vergrößerung des Außendurchmessers, so dass ausschließlich zwei Verformungskegel auftreten, führt nicht zu einer relevanten Verringerung der Nachgiebigkeit bzw. Veränderung der Nachgiebigkeitsverhältnisse. Dies gilt ebenso für die Verringerung des Außendurchmessers unter Berücksichtigung der Grenzwerte für Rand- und Lochabstände nach EN 1993-1-8. Neben der Klemmlänge werden daher keine weiteren geometrischen Parameter in die Modellberechnungen einbezogen.

### 5.8.2 Einfluss der Nachgiebigkeitsverhältnisse

Die Nachgiebigkeit der Schraubengarnitur beeinflusst im Verhältnis zur Nachgiebigkeit der Bauteile die Schraubenzusatzkraft. Die daraus entstehenden Vorspannkraftverluste  $F'_Z$  sind in Bild 5.22 für die Serie M16–H10–TS-A11 dargestellt. Für eine Montagevorspannkraft  $F_M$  von  $1,0 F_{p,c}$  liegt der Verlust  $F'_Z$  bei etwa  $0,18 F_{p,c}$  für eine bezogene Klemmlänge  $\Sigma t/d$  von 2. Für größere Klemmlängen verringern sich die entsprechenden Verluste, bei  $\Sigma t/d = 6$  auf etwa  $0,10 F_{p,c}$ , siehe Bild 5.22 (a). Ebenso werden die Vorspannkraftverluste bei Verwendung von Schrauben größerer Nachgiebigkeit verringert, vgl. HV-, HR- und HVN-Garnituren in Bild 5.22. Im Vergleich zum Einfluss der Klemmlänge ist der Einfluss der Art der Schraubengarnitur, d.h. der Nachgiebigkeit der Schraube, von geringer Bedeutung.

Der Krafteinleitungsfaktor hat nur einen signifikanten Einfluss auf die Schraubenzusatzkraft und den Vorspannkraftverlust, solange die Trennfuge überdrückt ist. Bei einer Montagevorspannkraft  $F_M$  von  $1,0 F_{p,c}$  tritt ein Klaffen der Trennfuge auf, so dass zwischen den Krafteinleitungsfaktoren 1,0 und 0,5 kein relevanter Unterschied besteht, vgl. Bild 5.22 (a) und (c). Dies gilt für sämtliche einbezogene direkte Kraftanzeiger, unabhängig von Durchmesser oder Festigkeitsklasse, siehe Bilder 5.23 und 5.24.

Das Klaffen der Trennfuge kann bei vorgegebener Axialkraft nur durch die Erhöhung des Vorspannkraftniveaus verhindert werden. Daher werden nachfolgend unterschiedliche Montagevorspannkraften berücksichtigt.

### 5.8.3 Einfluss des Vorspannkraftniveaus

Die Trennfuge ist unter Betriebsbeanspruchung  $F_A = F_{t,Rd}$  bei Montagevorspannkraften von  $1,1 F_{p,c}$  und  $1,2 F_{p,c}$  überdrückt. Für den ungünstigsten Krafteinleitungsfaktor von  $n = 1$  ist theoretisch ohne anfänglichen Vorspannkraftverlust durch Setzen ( $F_Z = 0$ ) mit bis zu  $0,08 F_{p,c}$  an betriebsbedingten Verlusten zu rechnen, siehe Bild 5.22 (a), und zwar unabhängig von der Höhe der Montagevorspannkraft, da die Schraubenzusatzkraft bei überdrückter Trennfuge ebenso vom Vorspannkraftniveau unabhängig ist. Für einen Krafteinleitungsfaktor von  $n = 0,5$  verringern sich die Verluste auf  $0,04 F_{p,c}$ , siehe Bild 5.22 (c), aufgrund der geringeren Schraubenzusatzkraft.

Unter praxisüblichen Bedingungen sind anfängliche Vorspannkraftverluste durch Setzen bereits vorhanden. Für ein Vorspannkraftniveau von  $1,1 F_{p,c}$  und einen anfänglichen Verlust von  $0,1 F_{p,c}$  durch Setzen sind keine zusätzlichen betriebsbedingten Verluste zu erwarten, siehe Bild 5.22 (b) und (d). Die Kurven verlaufen mit  $F'_Z = 0$  horizontal am oberen Rand. Die in diesem Fall zur Vorspannkraft  $F_{S,ini} = 1,0 F_{p,c}$  hinzukommende Schraubenzusatzkraft vermag es nicht die Schraubenkraft über das vormalig höchste Niveau von  $F_M = 1,1 F_{p,c}$  hinaus zu steigern, so dass keine weiteren plastischen Verformungen der Überstände auftreten. Die Restvorspannkraft  $F'_V = 1,0 F_{p,c}$  ist letztendlich aber trotzdem geringer im Vergleich zur Restvorspannkraft ( $F'_V = 1,02 F_{p,c}$ ) nach einem Lastwechsel mit betriebsbedingten Verlusten ( $F'_Z = 0,08 F_{p,c}$ ) aber ohne vorhergehende Setzkraftverluste ( $F_Z = 0$ ), vgl. Bild 5.22 (a) und (c). Die vergleichende Bestimmung der Restvorspannkraft  $F'_V$  erfolgt exemplarisch für Bild 5.22 mit Hilfe der folgenden Gleichungen (5.31) und (5.32) in Tabelle 5.13.

$$F_{S,ini} = F_M - F_Z \quad (5.31)$$

$$F'_V = F_{S,ini} - F'_Z \quad (5.32)$$

Für den Fall, dass in der Montage die Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  als Drucklast auf den direkten Kraftanzeiger nicht erreicht werden sollte, ist nach einem einzelnen Lastwechsel mit der Axialkraft  $F_A = F_{t,Rd}$  ein erheblicher Vorspannkraftverlust zu erwarten. Für eine Montagevorspannkraft  $F_M$  von  $0,95 F_{p,c}$  liegt der Verlust  $F'_Z$  bei etwa  $0,5 F_{p,c}$  für eine bezogene Klemmlänge  $\Sigma t/d$  von 2. Für größere Klemmlän-

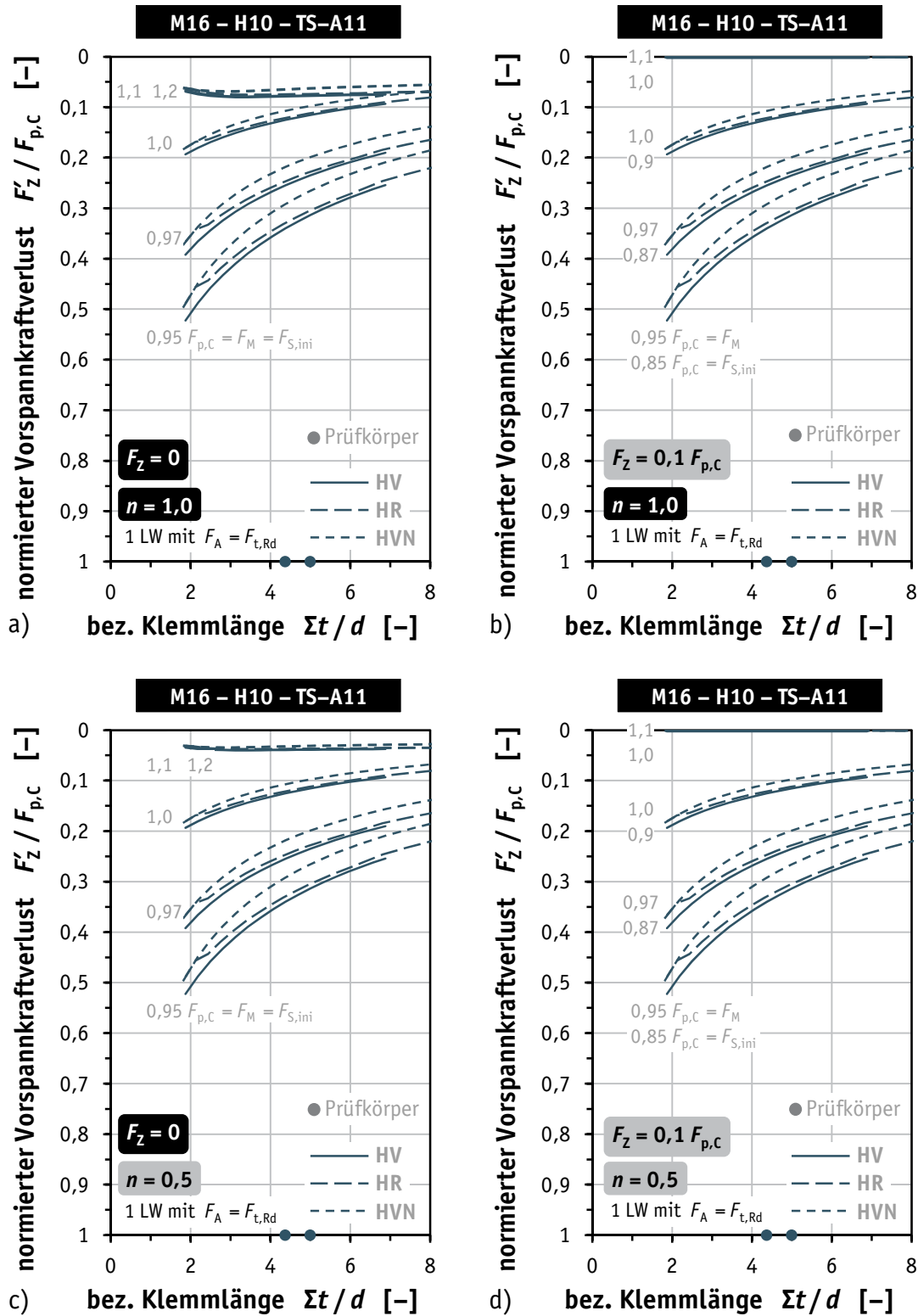
gen verringern sich die entsprechenden Verluste, bei  $\Sigma t/d = 6$  auf etwa  $0,28 F_{p,C}$ , siehe Bild 5.22.

Bei Zunahme der Montagevorspannkraft auf  $0,97 F_{p,C}$  ist eine Reduzierung des Verlustes auf etwa  $0,4 F_{p,C}$  ( $\Sigma t/d = 2$ ) ersichtlich. Dies ist unabhängig vom Kräfteinleitungsfaktor, vgl. Bild 5.22 (a)/(b) mit (c)/(d), und auch unabhängig von anfänglichen Vorspannkraftverlusten, vgl. (a)/(c) mit (b)/(d), da die dargestellten Vorspannkraftniveaus  $0,95 F_{p,C}$ ,  $0,97 F_{p,C}$  und  $1,0 F_{p,C}$  unter einer Axialkraft von  $F_A = F_{t,Rd}$  nicht ausreichen, um das Klaffen der Trennfuge zu verhindern.

**Tabelle 5.13.** Restvorspannkraft  $F'_V$  für DTI M16 – H10 – TS-A11 nach einem Lastwechsel  $F_A = F_{t,Rd}$  mit und ohne vorhergehendem Setzkraftverlust  $F_Z$

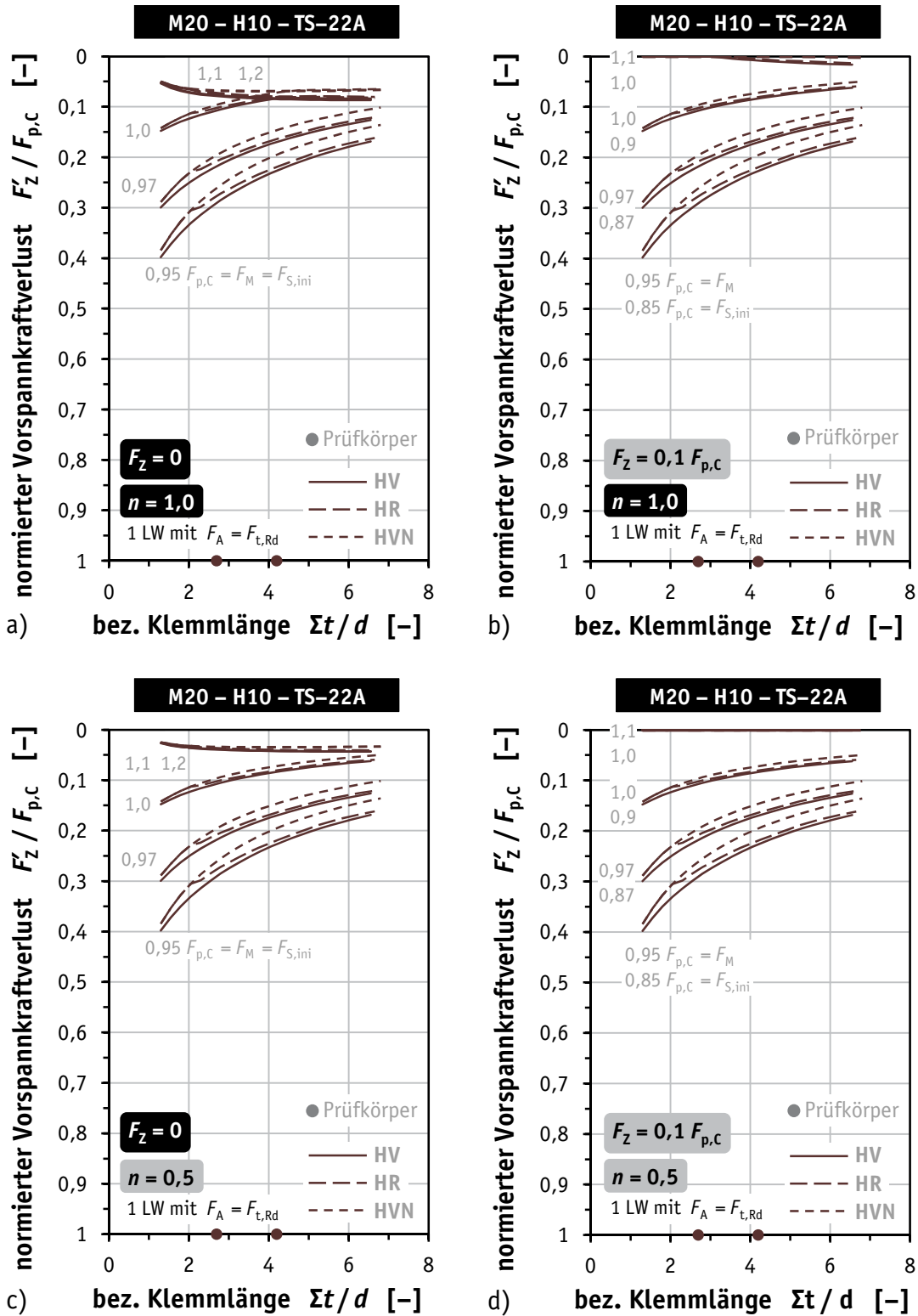
**Table 5.13.** Residual preloads  $F'_V$  for DTI M16 – H10 – TS-A11 after one load cycle  $F_A = F_{t,Rd}$  with and without previous loss of preload  $F_Z$  due to embedding

Bild 5.22	$F_A/F_{p,C}$	$n$	$F_M/F_{p,C}$	$F_Z/F_{p,C}$	$F_{S,ini}/F_{p,C}$	$F'_Z/F_{p,C}$	$F'_V/F_{p,C}$	
(a)	1,03	1,0	1,1	0	1,1	$\approx 0,08$	$\approx 1,02$	
(b)				0,1	1,0	0	1,0	
(c)		0,5		0	1,1	$\approx 0,04$	$\approx 1,06$	
(d)				0,1	1,0	0	1,0	



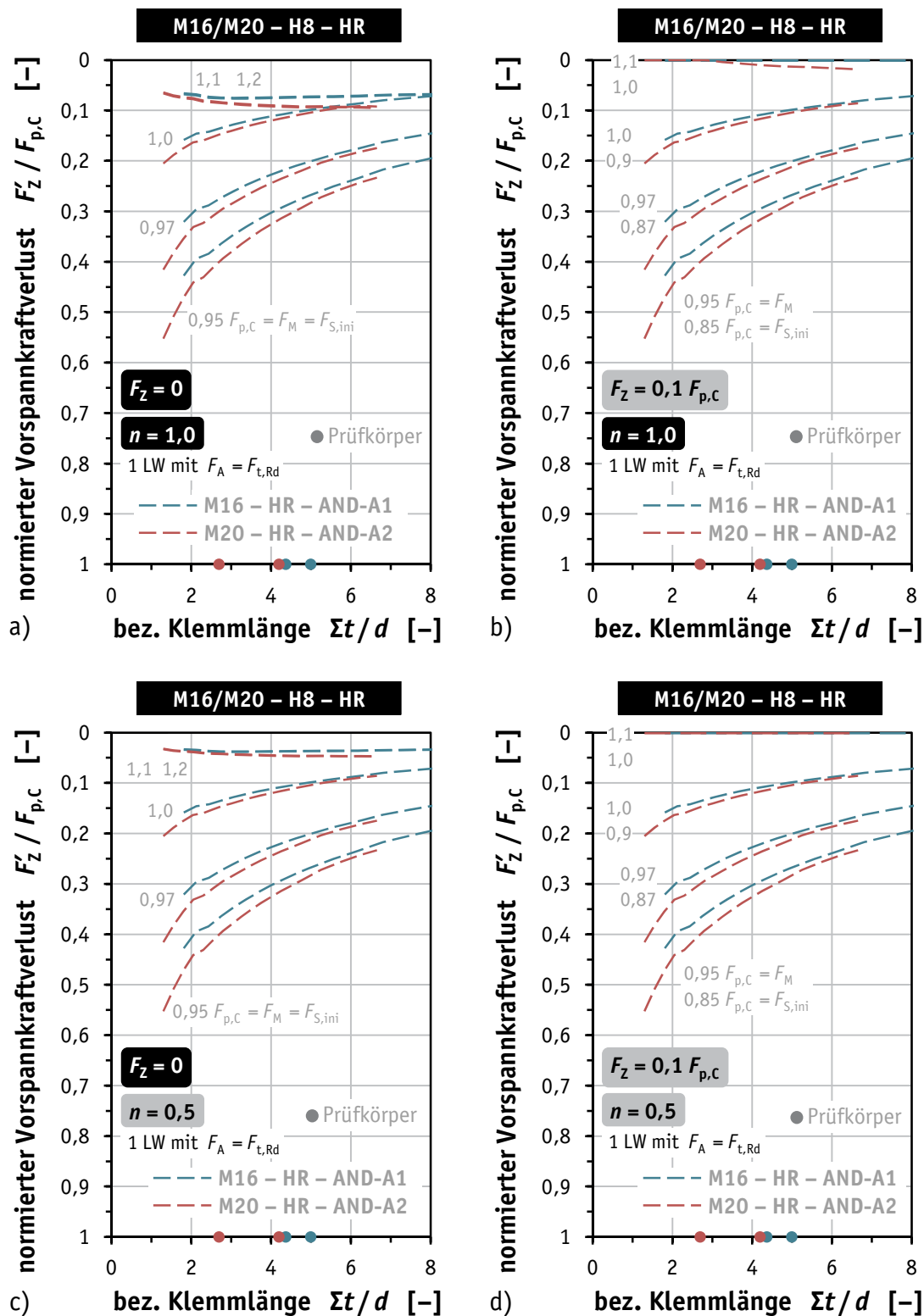
**Bild 5.22.** Vorspannkraftverluste für DTI M16 – H10 – TS-A11 bei einem Lastwechsel  $F_A = F_{t,Rd}$  mit  $n = 1,0$  (a, b) und  $n = 0,5$  (c, d) sowie  $F_Z = 0$  (a, c) und  $F_Z = 0,1 F_{p,c}$  (b, d)

**Figure 5.22.** Losses of preload for DTI M16 – H10 – TS-A11 by one load cycle  $F_A = F_{t,Rd}$  with  $n = 1.0$  (a, b) and  $n = 0.5$  (c, d) as well as  $F_Z = 0$  (a, c) and  $F_Z = 0.1 F_{p,c}$  (b, d)



**Bild 5.23.** Vorspannkraftverluste für DTI M20 – H10 – TS-22A bei einem Lastwechsel  $F_A = F_{t,Rd}$  mit  $n = 1.0$  (a, b) und  $n = 0.5$  (c, d) sowie  $F_z = 0$  (a, c) und  $F_z = 0.1 F_{p,c}$  (b, d)

**Figure 5.23.** Losses of preload for DTI M20 – H10 – TS-22A by one load cycle  $F_A = F_{t,Rd}$  with  $n = 1.0$  (a, b) and  $n = 0.5$  (c, d) as well as  $F_z = 0$  (a, c) and  $F_z = 0.1 F_{p,c}$  (b, d)



**Bild 5.24.** Vorspannkraftverluste für DTI M16 – H8 – AND-A1 und M20 – H8 – AND-A2 bei einem Lastwechsel  $F_A = F_{t,Rd}$  mit  $n = 1,0$  (a, b) und  $n = 0,5$  (c, d) sowie  $F_Z = 0$  (a, c) und  $F_Z = 0,1 F_{p,c}$  (b, d)

**Figure 5.24.** Losses of preload for DTI M16 – H8 – AND-A1 and M20 – H8 – AND-A2 by one load cycle  $F_A = F_{t,Rd}$  with  $n = 1.0$  (a, b) and  $n = 0.5$  (c, d) as well as  $F_Z = 0$  (a, c) and  $F_Z = 0.1 F_{p,c}$  (b, d)



### 5.8.4 Einfluss des Beanspruchungsniveaus

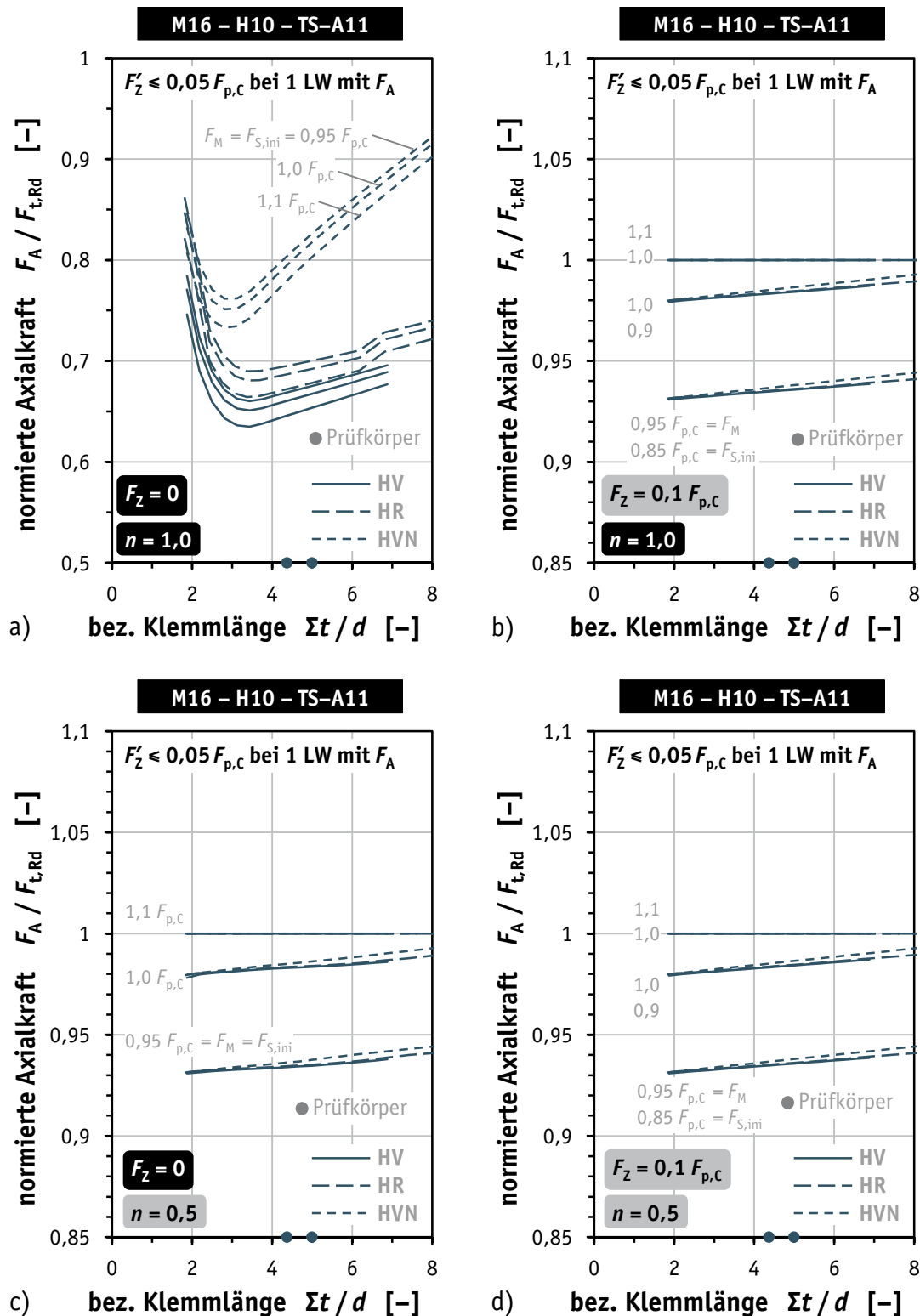
Bei einer ausreichend hohen Montagevorspannkraft über dem Niveau der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$  sind die betriebsbedingten Vorspannkraftverluste aus dem Verhalten des DTI derart begrenzt, dass die Vorspannkraft nicht unter die Mindestvorspannkraft fällt und ein Klaffen der Trennfuge verhindert wird. Falls nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Montagevorspannkraft die Mindestvorspannkraft nicht erreicht bzw. nicht übertrifft, kann zumindest eine Begrenzung der Größe der einwirkenden Axialkraft zur Vermeidung von hohen Vorspannkraftverlusten beitragen.

Für den Referenzfall unter Berücksichtigung eines Krafteinleitungsfaktors von  $n=1$  und ohne Setzkraftverluste ( $F_Z=0$ ) kann der betriebsbedingte Vorspannkraftverlust auf  $F'_Z \leq 0,05 F_{p,c}$  begrenzt werden, indem die zulässige Axialkraft auf  $0,64 F_{t,Rd}$  reduziert wird, siehe Bild 5.25 (a).

Dies ist allerdings nur nötig, falls keine anderweitigen Vorspannkraftverluste vorliegen und das Niveau der Montagevorspannkraft unbedingt erhalten werden muss, weil es nur geringfügig über der Mindestvorspannkraft liegt.

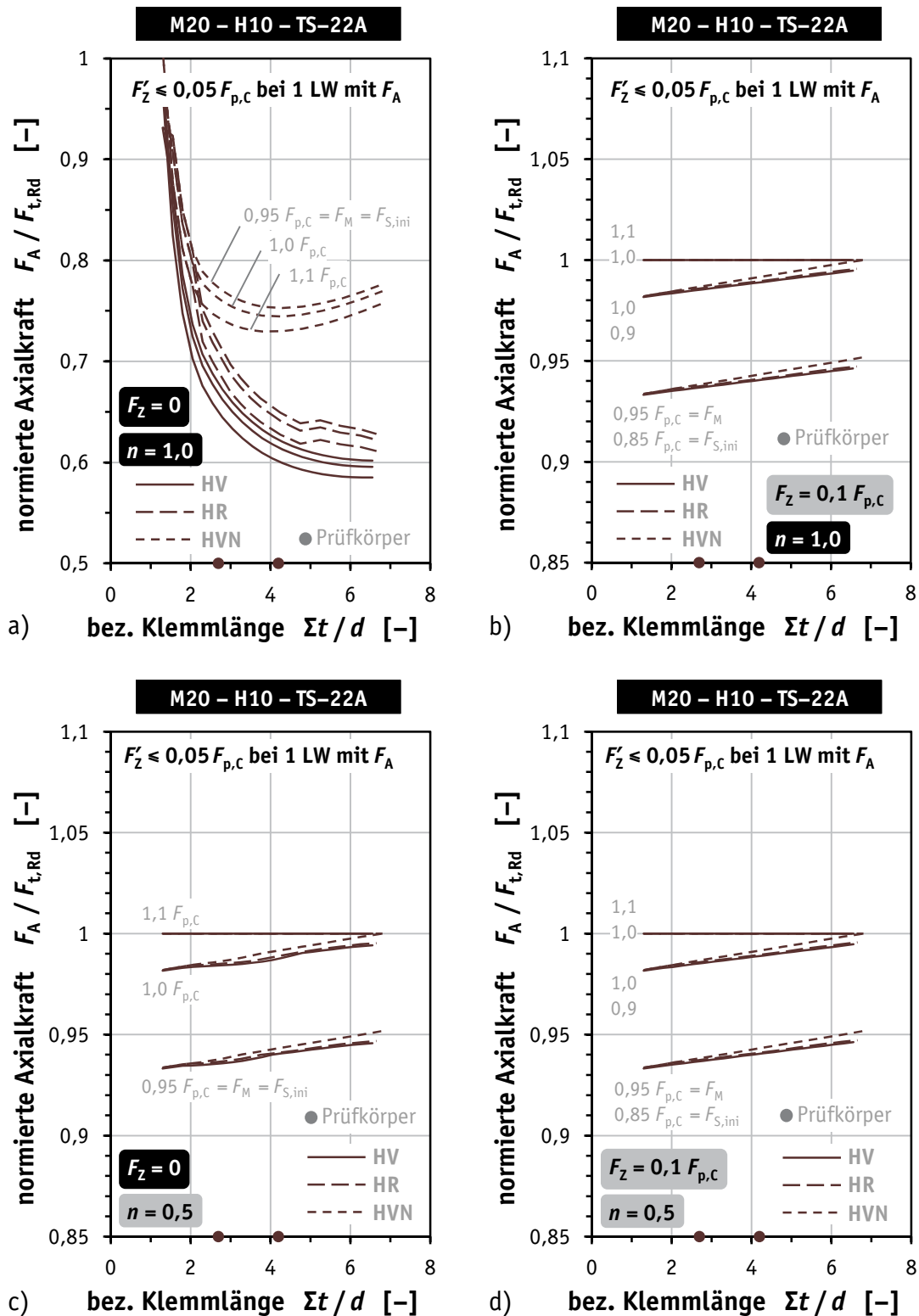
Unter Berücksichtigung anfänglicher Verluste durch Setzen von  $0,1 F_{p,c}$  entsprechend Bild 5.25 (b) sind weitere betriebsbedingte Verluste auf  $F'_Z \leq 0,05 F_{p,c}$  begrenzbar, indem die Axialkraft ebenso, allerdings in geringerem Maße, abgemindert wird. Für eine Montagevorspannkraft von  $0,95 F_{p,c}$  ist eine Abminderung auf  $0,93 F_{t,Rd}$  ausreichend, bei  $1,0 F_{p,c}$  eine Abminderung auf  $0,98 F_{p,c}$ .

Liegt die Montagevorspannkraft oberhalb von  $1,1 F_{p,c}$ , so ist für alle vorliegenden direkten Kraftanzeiger auch mit dem ungünstigsten Krafteinleitungsfaktor von  $n=1$  sichergestellt, dass bei Axialkräften  $F_A = F_{t,Rd}$  der Vorspannkraftverlust unterhalb von  $0,05 F_{p,c}$  verbleibt und somit die Vorspannkraft über der Mindestvorspannkraft erhalten bleibt, siehe Bilder 5.25, 5.26 und 5.27. Dabei sind allerdings zusätzliche negative Einflüsse auf den Erhalt der Vorspannkraft außerhalb der Modellbildung für den direkten Kraftanzeiger nicht erfasst, vgl. Tabelle 5.12.



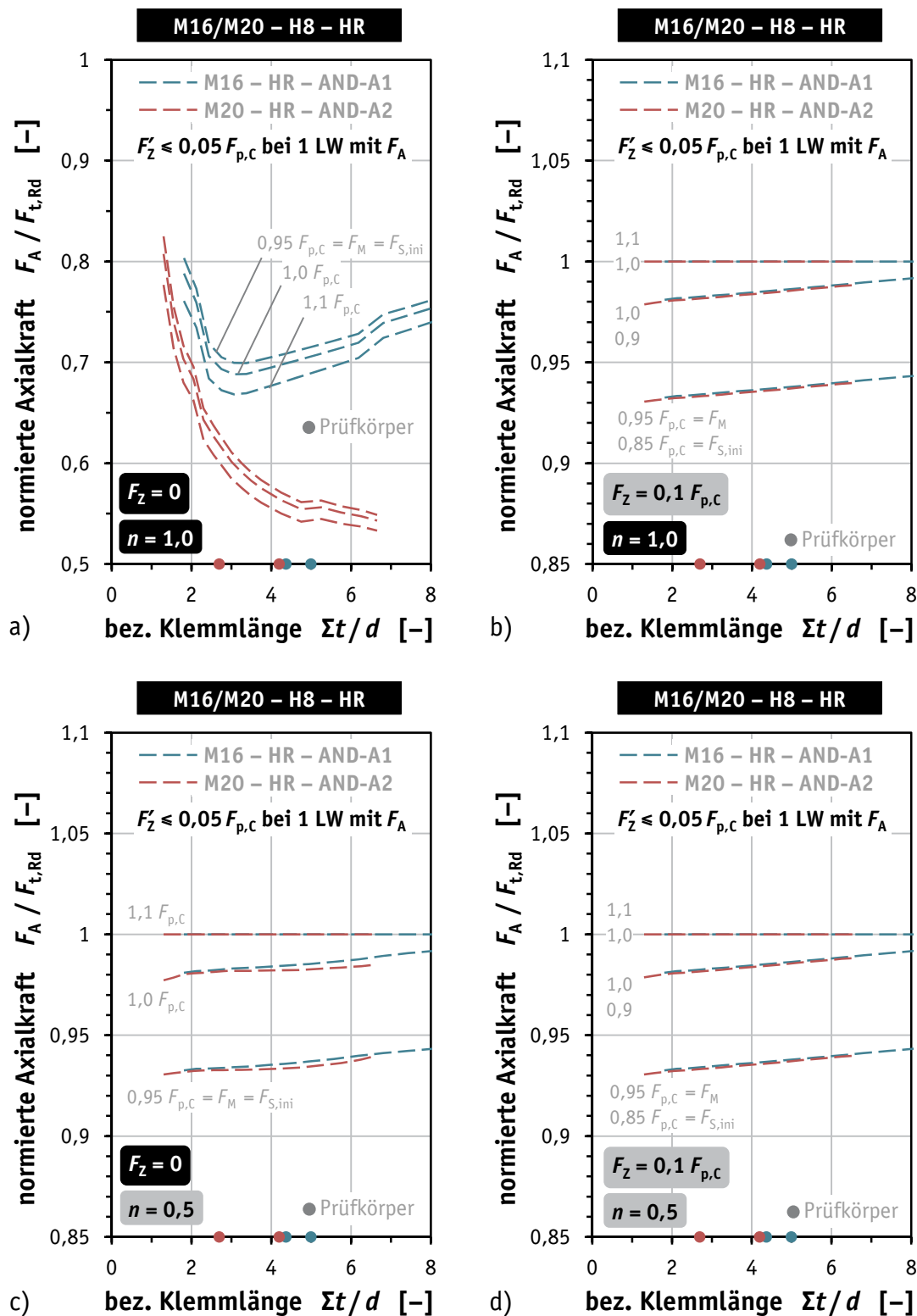
**Bild 5.25.** Zulässige Axialkräfte für DTI M16 - H10 - TS-A11 für einen maximalen Vorspannkraftverlust von  $F'_Z \leq 0,05 F_{p,C}$  mit  $n = 1,0$  (a, b) und  $n = 0,5$  (c, d) sowie  $F_Z = 0$  (a, c) und  $F_Z = 0,1$  (b, d)

**Figure 5.25.** Permitted axial loads for DTI M16 - H10 - TS-A11 for a maximum loss of preload of  $F'_Z \leq 0,05 F_{p,C}$  with  $n = 1.0$  (a, b) and  $n = 0.5$  (c, d) as well as  $F_Z = 0$  (a, c) and  $F_Z = 0.1$  (b, d)



**Bild 5.26.** Zulässige Axialkräfte für DTI M20 – H10 – TS-22A für einen maximalen Vorspannkraftverlust von  $F_Z \leq 0,05 F_{p,c}$  mit  $n = 1,0$  (a, b) und  $n = 0,5$  (c, d) sowie  $F_Z = 0$  (a, c) und  $F_Z = 0,1$  (b, d)

**Figure 5.26.** Permitted axial loads for DTI M20 – H10 – TS-22A for a maximum loss of pre-load of  $F_Z \leq 0,05 F_{p,c}$  with  $n = 1,0$  (a, b) and  $n = 0,5$  (c, d) as well as  $F_Z = 0$  (a, c) and  $F_Z = 0,1$  (b, d)



**Bild 5.27.** Zulässige Axialkräfte für DTI M16 – H8 – AND-A1 und M20 – H8 – AND-A2 für einen maximalen Vorspannkraftverlust von  $F'_Z \leq 0,05 F_{p,c}$  mit  $n = 1,0$  (a, b) und  $n = 0,5$  (c, d) sowie  $F_Z = 0$  (a, c) und  $F_Z = 0,1$  (b, d)

**Figure 5.27.** Permitted axial loads for DTI M16 – H8 – AND-A1 and M20 – H8 – AND-A2 for a maximum loss of preload of  $F'_Z \leq 0,05 F_{p,c}$  with  $n = 1.0$  (a, b) and  $n = 0.5$  (c, d) as well as  $F_Z = 0$  (a, c) and  $F_Z = 0.1$  (b, d)

### 5.8.5 Begrenzung der Axialkraft zur Vermeidung von Vorspannkraftverlusten

Im Rahmen der vorliegenden Modellbildung ist ersichtlich, dass ungeachtet sonstiger Vorspannkraftverluste bei einem Niveau der aktuellen Vorspannkraft von  $F_M = F_{S,ini} = 1,1 F_{p,c}$  Vorspannkraftverluste aus der fortschreitenden plastischen Abplattung der Überstände des DTI nur verhindert werden können, falls die einwirkende Axialkraft in ihrer Größe begrenzt wird. Aus den Bilder 5.25 (a), 5.26 (a) und 5.27 (a) sind näherungsweise die nachfolgenden ungünstigsten Obergrenzen für die Axialkraft  $F_A$  abzulesen, damit der Vorspannkraftverlust auf  $F_z \leq 0,05 F_{p,c}$  begrenzt bleibt. Mit Gleichung (3.2) ergeben sich daraus zusätzlich folgende Obergrenzen in Abhängigkeit von der Mindestvorspannkraft  $F_{p,c}$ :

$$\begin{aligned} \text{M16 – H10 – TS-A11:} \quad F_A &\leq 0,65 \cdot F_{t,Rd} \approx 0,67 \cdot F_{p,c} \\ \text{M20 – H10 – TS-22A:} \quad F_A &\leq 0,60 \cdot F_{t,Rd} \approx 0,62 \cdot F_{p,c} \\ \text{M16 – H8 – AND-A1:} \quad F_A &\leq 0,70 \cdot F_{t,Rd} \approx 0,72 \cdot F_{p,c} \\ \text{M20 – H8 – AND-A2:} \quad F_A &\leq 0,55 \cdot F_{t,Rd} \approx 0,57 \cdot F_{p,c} \end{aligned}$$

Im Rückblick auf die vormaligen Regelwerke ist festzustellen, dass die damals u. a. nach BS 4604 zulässige Zugbeanspruchung entsprechend Gleichung (3.26):

$$F_{\text{tot}} \leq 0,6 \cdot P_o$$

in Abhängigkeit von der Mindestvorspannkraft  $P_o$  derart niedrig ist, dass ein Vorspannkraftverlust für die untersuchten direkten Kraftanzeiger mit den dargelegten Annahmen der Modellbildung ausgeschlossen werden kann. Dabei ist diese zulässige Zugbeanspruchung im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen nicht übermäßig konservativ.

Für den Nachweis von direkten Kraftanzeigern in zugbeanspruchten Verbindungen ist daher die (Wieder-)Einführung eines zusätzlichen Nachweiskriteriums angeraten, um die Verwendung abzusichern und zu ermöglichen.



## 6 Empfehlungen für die Prüfung und Anwendung von direkten Kraftanzeigern

### 6.1 Allgemeines

Aus den vorangegangenen experimentellen Untersuchungen sowie den Überlegungen zur Modellbildung lassen sich Empfehlungen für die Überprüfung und Anwendung von direkten Kraftanzeigern herleiten. Diese betreffen

- die Eignungsprüfung nach EN 14399-9,
- die Kalibrierprüfung unter Baustellenbedingungen nach EN 1090-2,
- das vollständige Schließen der Spalte beim Anziehen,
- die Eignung der direkten Kraftanzeiger für den Einsatz in zugbeanspruchten Verbindungen und
- die allgemeine Weiterentwicklung der Regelwerke.

Abschließend werden die Empfehlungen zur Anwendung von direkten Kraftanzeigern zusammengefasst und anhand von Beispielen veranschaulicht.

### 6.2 Eignungsprüfung nach EN 14399-9

Die Eignungsprüfung nach EN 14399-9 beinhaltet den Drucklastversuch am direkten Kraftanzeiger sowie den Anziehversuch an der Garnitur mit direktem Kraftanzeiger.

Der Drucklastversuch dient lediglich der Prüfung des DTI im Hinblick auf das Last-Verformung-Verhalten unter alleiniger axialer Druckbeanspruchung. Hierüber ist es dem Hersteller möglich, die Überstände des DTI so auszubilden, dass bei geforderter Höhe des Spaltes eine Mindestkraft erreicht wird. Der Drucklastversuch stellt damit die Normanforderung an das Produkt DTI dar. Beim Erreichen eines Spaltes von 0,4 mm muss die erforderliche Druckkraft zwischen  $1,0 F_{p,c}$  und  $1,2 F_{p,c}$  liegen.

Für den Einsatz des DTI in der Garnitur ist der Drucklastversuch allerdings von geringer Bedeutung, da das Last-Verformung-Verhalten in der Garnitur beim

Anziehen durch Drehen einer Komponente signifikant abweicht. Bei identischem mittlerem Restspalt ist beim Anziehen eine geringere Kraft erforderlich. Dies bedeutet in letzter Konsequenz, dass beim realen Anziehen auch eine geringere Vorspannkraft in der Schraube ist. Wurde nun beim Drucklastversuch lediglich die untere Grenze von  $1,0 F_{p,c}$  beim Erreichen des maßgebenden Restspaltes erzielt, gilt die Unterstellung der EN 1090-2 nicht mehr, dass Vorspannkraftverluste, die gerade bei Einsatz von DTI aufgrund der geringen Steifigkeit der Überstände und des planmäßigen Plastizierens derselben besonders hoch sind, implizit in dem Anziehverfahren mit DTI berücksichtigt sind. Des Weiteren wird der Anziehversuch in der Regel von direkten Kraftanzeigern, die gerade eben das zuvor genannte Kriterium erfüllen, nicht bestanden.

Aus diesem Grund wird dem Hersteller von DTI empfohlen, die Ausbildung des DTI nicht alleine vom Bestehen des Drucklastversuches abhängig zu machen, sondern immer in Kombination mit Anziehversuchen auszulegen.

Des Weiteren sind gezielte Untersuchungen zur Erfassung der Höhe des Vorspannkraftverlustes beim Einsatz von DTI in Scher- und Zugverbindungen angeraten, um die tatsächliche Vorspannkraft in der vorgespannten Verbindung der Kategorien B, C und E nach EN 1993-1-8 zu quantifizieren, da diese Verbindungen tragsicherheitsrelevant sind.

Der wesentlich wichtigere Anziehversuch in EN 14399-9 beschränkt sich lediglich auf das Erreichen der Mindestvorspannkraft von  $F_{p,c}$  bei der vorgegebenen Höhe des Spaltes von 0,4 mm bzw. 0,25 mm je nach Konfiguration. Zum einen ist dies im Versuch nur bedingt umsetzbar. Zum anderen sind auch hier wieder Vorspannkraftverluste, die in der Verbindung auftreten werden und wie zuvor beschrieben in der EN 1090-2 implizit berücksichtigt sein sollen, nicht abgedeckt. Auch hier gilt es, den Anziehversuch so zu modifizieren, dass zum Beispiel bei definiertem Vorspannkraftniveau die Anzahl der mit der maßgebenden Fühllehre festgestellten Sperrweiten eingehalten ist. Das definierte Vorspannkraftniveau muss so festgelegt werden, dass Vorspannkraftverluste bis zum Erreichen des für die Bemessung erforderlichen Vorspannkraftniveaus berücksichtigt sind.

Dazu ist alternativ entweder der untere Grenzwert anzuheben, den jedes individuelle Prüfergebnis einzuhalten hat, oder ein unterer Grenzwert für den Mittelwert der Prüfergebnisse zusätzlich zu definieren.

Grundsätzlich stellt sich die Frage, warum für den Nachweis des Weiterdrehwinkels  $1,1 \Delta\theta_{2\min}$  die Prüfung in zwei Montagekonfigurationen durchzuführen ist,



für den entscheidenden Nachweis des Erreichens der Mindestvorspannkraft allerdings nur eine einzige Montagekonfiguration exakt vorgegeben und gefordert ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Unterschiede zwischen den Konfigurationen zum Nachweis des Weiterdrehwinkels von geringerer Bedeutung sind.

Demgegenüber ist mit der Prüfung einer einzigen Konfiguration nicht sichergestellt, dass das definierte Fühllehren-Kriterium auch in der zweiten Konfiguration erfolgreich angewendet werden kann. Falls dem – aus langjähriger Praxis bekannt und nachgewiesen – doch so wäre, dann sollte dies entsprechend kommentiert werden.

Bedauerlicherweise heißt es in EN 14399-9:

*„Der mittlere festgelegte Spalt des direkten Kraftanzeigers muss mit Hilfe des folgenden Messverfahrens bestimmt werden; die Fühllehre ist als „Ausschuss-Prüfzeug“ anzuwenden.“*

Damit ist die Anwendung des Fühllehren-Kriteriums gemeint, die aus dem Einsatz einer einzelnen (Fühl-)Lehre besteht. Da mit einer Lehre grundsätzlich kein Messwert erzielt werden kann und es sich streng genommen nicht um ein Messverfahren handelt, sollte die entsprechende Formulierung geändert werden.

Wie in den experimentellen Untersuchungen gezeigt, wäre unter Verwendung einer Palette von Fühllehren eine „Vermessung“ der Höhe des Spaltes möglich. Das Ergebnis ist allerdings erheblich von der Abstufung der verwendeten Fühllehren abhängig, die zur Erzielung vergleichbarer Ergebnisse einer genauen Festlegung bedarf. Da ein erheblicher Aufwand bei dieser Art von Messung besteht, ist diese als Prüfverfahren nicht zu empfehlen und im Übrigen auch nicht notwendig, sofern nicht die Bestimmung der Vorspannkraft an einem Spalt definierter Höhe, sondern die Erfüllung des Fühllehren-Kriteriums mit Erreichen der geforderten Anzahl an Sperrweiten bei einer definierten Vorspannkraft gefordert würde.

In EN 1090-2 heißt es in Ergänzung des Fühllehren-Kriteriums:

*„Die an der anzeigenden Scheibe gemessenen Spalte dürfen bei der Beurteilung einer Garnitur gemittelt werden.“*

Es besteht zwar eine gewisse Konsistenz zwischen den Formulierungen in EN 14399-9 und EN 1090-2; aufgrund der vorherigen Ausführungen ist diese Darf-Regel, die vermeintlich als Handlungsanweisung verstanden werden könnte, allerdings entbehrlich. Da die Anwendung des Fühllehren-Kriteriums die „Mitte-

lung“ impliziert, bedarf es dementsprechend keiner gesonderten Mittelung. SCHMIDT ET AL. [SZB12] kommentieren die gegebene Erlaubnis zu Recht ebenfalls kritisch, da keine Informationen zur Verwendung des möglicherweise bestimmten Mittelwertes weder in EN 1090-2 noch in EN 14399-9 zu finden sind.

Bei der Betrachtung von BS 7644-1 ist ersichtlich, dass diese Formulierung zum vormaligen Verfahren gehört, siehe Kapitel 3.5.3.1, und anscheinend in EN 1090-2 verblieben ist, obwohl die Vorgehensweise nach EN 14399-9 dem nordamerikanischen Vorbild angepasst wurde. Sie ist daher zu entfernen.

### 6.3 Kalibrierprüfung unter Baustellenbedingungen nach EN 1090-2

In EN 1090-2, Anhang H ist eine Versuchsprozedur geregelt, die den Zweck hat, die Anziehparameter zu bestimmen, *„die zur Sicherstellung des Mindestwertes der geforderten Vorspannung durch Anwendung der in dieser Europäischen Norm festgelegten Anziehverfahren erforderlich sind.“* Die Versuchsdurchführung und Bewertung der Versuchsergebnisse wird von SCHMIDT ET AL. [SZB12] umfassend kommentiert, wobei die speziellen – und scheinbar eindeutigen – Regeln für das Verfahren mit direkten Kraftanzeigern keiner weiteren Kommentierung bedurften. Vor dem Hintergrund der in den vorliegenden experimentellen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse bedarf es jedoch zusätzlicher Kommentare.

Grundsätzlich ist das Verfahren mit direkten Kraftanzeigern unabhängig von den Reibungsverhältnissen, so dass die Bestimmung eines Referenz-Drehmomentes nicht erforderlich ist und die Änderung der werksseitigen Schmierung für das Erreichen der Mindestvorspannkraft geringere Bedeutung hat. Eine Einschränkung der Gebrauchseignung ist aber weiterhin zu beachten, siehe Kapitel 4.4.3.1 sowie [SS12b]. Eine Kalibrierprüfung aufgrund von ungewöhnlichen Expositionsbedingungen bei der Lagerung und Montage der Garnituren mit DTI zu veranlassen, erscheint daher eher unwahrscheinlich.

Zudem sind sämtliche Montagekonfigurationen vorsorglich in EN 14399-9 berücksichtigt, zugelassen und mit dem erforderlichen Anziehparameter – der Dicke der anzuwendenden Fühllehre – ausgestattet, und zwar ohne eine zusätzliche Kalibrierprüfung, wie sie beispielsweise für das Drehmoment- und kombinierte Verfahren bei kopfseitigem Anziehen erforderlich wäre.

Es entsteht der Eindruck, als ob das Verfahren mit direkten Kraftanzeigern in der geregelten Form nur der Vollständigkeit halber mit den anderen Anziehverfahren in Anhang H aufgeführt ist. Die Bewertung der Versuchsergebnisse

stimmt exakt mit den Vorgaben der Gebrauchseignungsprüfung nach EN 14399-9 überein. Die Vorgehensweise ermöglicht also keine Kalibrierung, d.h. Anpassung der Anziehparameter an besondere Bedingungen, sondern erlaubt lediglich die Bewertung der Garnituren mit DTI in den Kategorien *verwendbar* oder *nicht verwendbar*.

Die Anwendung dieser Bewertung wäre immerhin vorstellbar, falls bereits ausgelieferte Garnituren ohne DTI nachträglich für das Anziehen mit direktem Kraftanzeiger qualifiziert werden sollen, insbesondere beim Bezug von Garnituren sowie direkten Kraftanzeigern einschließlich zugehöriger Scheiben von unterschiedlichen Herstellern.

Besondere Bedeutung für die ordnungsgemäße Funktion des DTI hat die Ebenheit der angrenzenden Auflageflächen. Eine außerordentliche Abweichung der Ebenheit und Winkligkeit von den zulässigen Toleranzen – auch trotz der Verwendung von Keilscheiben – könnte als Anwendungsfall für die Kalibrierprüfung betrachtet werden. Dieses Szenario stellt allerdings auch für alle anderen Anziehverfahren eine große Herausforderung dar.

Hierbei ist nicht nur dem Verhalten der Komponenten der Garnitur Beachtung zu schenken, sondern insbesondere der zuverlässigen Messung der Vorspannkraft durch die Messeinrichtung. Die allermeisten Vorrichtungen, insbesondere die mechanischen, reagieren sehr empfindlich auf exzentrische Lasteinleitungen, so dass kein zuverlässiger Messwert zu erhalten ist. Inwieweit hydraulische Vorrichtungen zur Messung der Vorspannkraft unempfindlicher gegenüber einer stark exzentrischen Lasteinleitung sind, ist für den jeweiligen Anwendungsfall zu überprüfen. Bedenken bestehen allerdings auch in diesem Fall.

Um den eigentlichen Zweck der Kalibrierprüfung auch für die Anwendung von direkten Kraftanzeigern zugänglich zu machen, ist die Bestimmung bzw. Änderung mindestens eines Anziehparameters als Ergebnis der Kalibrierprüfung anzustreben. Dies kann praktikabler Weise nur die Dicke der anzuwendenden Fühllehre sein, um so auf besondere Bedingungen reagieren zu können und gleichzeitig die Mindestvorspannkraft gewährleisten zu können.

Dazu ist es ratsam, im Versuch die Mindestvorspannkraft oder sogar einen höheren Wert der Vorspannkraft durch Anziehen der Garnitur anzusteuern. Die Anwendung des Fühllehren-Kriteriums mit unterschiedlich dicken Fühllehren erlaubt an dieser Stelle die Festlegung einer bestimmten Dicke der Fühllehre, so dass bei diesem Vorspannkraftniveau nicht ausreichend viele Sperrweiten zu zäh-

len sind, bei einem höheren Niveau jedoch schon. Die Durchführung von mindestens acht solcher Anziehversuche muss die Wirksamkeit der festgelegten Fühllehre bestätigen.

Ein ähnliches Verfahren ist in Nordamerika unter der Bezeichnung „*Field testing of direct tension indicators for bolt tension*“ nach ASTM F959 / F959M geläufig. Ziel ist die Bestimmung eines individuellen Spaltes (*Job Inspection Gap*) bzw. der korrespondierenden Fühllehre, die die 1,05-fache Mindestvorspannkraft zuverlässig erzielen lässt:

„*The job inspection gap shall be a gap less than the measured DTI test gap at 1.05× the minimum required bolt tension.*“

Auch wenn diese *Job Inspection Gap* üblicherweise vom Hersteller der direkten Kraftanzeiger bestimmt wird und dieser die passende Fühllehre mitliefert [Ku05], so ist im Rahmen der obligatorischen *Pre-Installation Verification* gemäß [RCSC14] zumindest die Überprüfung unter Baustellenbedingungen – mit den tatsächlich beteiligten Garnituren, Werkzeugen und Monteuren – erfolgreich durchzuführen.

Auch hier ist leider im Wortgebrauch von der Messung des Spaltes die Rede, tatsächlich allerdings nur die (Fühl-)Lehrenprüfung als Vergleich zwischen Soll- und Ist-Zustand gemeint.

## 6.4 Vollständiges Schließen der Spalte beim Anziehen

Grundsätzlich sind die Anziehverfahren nach EN 1090-2 nicht nur für das sichere Erreichen der Mindestvorspannkraft, sondern auch gegen ein übermäßiges Anziehen ausgelegt, das die Tragsicherheit der Verbindung und die Sicherheit des Monteurs beeinträchtigen kann. Beim Drehmomentverfahren und beim Verfahren mit HRC-Garnituren ist dies durch die Begrenzung der Streuung der Reibigenschaften sowie durch einen ausreichenden Abstand zum plastischen Verformungsbereich der Garnitur sichergestellt. Für das kombinierte Verfahren sind die Weiterdrehwinkel derart abgestimmt, dass bei korrektem ersten Anziehschritt übermäßiges Anziehen nicht auftritt.

Für das Verfahren mit direkten Kraftanzeigern ist neben der Kontrolle auf Erreichen des Fühllehren-Kriteriums – zur Sicherstellung der Mindestvorspannkraft – auch ein übermäßiges Anziehen zu kontrollieren, das wie folgt definiert ist:

„*Die Sichtprüfung muss eine Überprüfung beinhalten, bei der alle Anzeiger, die eine vollständige Eindrückung des Anzeigers aufweisen, festgestellt werden. Nicht mehr*

*als 10 % der Anzeiger in einer Schraubengruppe einer Verbindung dürfen eine vollständige Eindrückung des Anzeigers aufweisen.“*

Damit ist es grundsätzlich erforderlich, alle direkten Kraftanzeiger in die Sichtprüfung einzubeziehen. Je nach Zugänglichkeit bestehen allerdings erhebliche Zweifel, ob eine solche Sichtprüfung überhaupt zum gewünschten Ergebnis führen kann. In den experimentellen Untersuchungen hat sich trotz bester Zugänglichkeit gezeigt, dass vor allem der Spalt zwischen dem direkten Kraftanzeiger und dem Schraubenkopf – falls die schraubenkopfseitige Scheibe entfallen darf – sowohl mit der Fühllehre als auch visuell schwerer zu beurteilen ist. Dies liegt zum einen an den überstehenden Ecken des Sechskantkopfes, zum anderen an dem Telleransatz, gegen den die Fühllehre bei geringer Sorgfalt angelegt werden kann, ohne den Spalt zu erreichen. Bei mangelnder visueller Zugänglichkeit müsste eine Fühllehre mit definierter Dicke festgelegt werden, die zur Beurteilung der *vollständigen Eindrückung des Anzeigers* alternativ anzuwenden wäre.

Da sich die Überstände erwiesenermaßen überwiegend ungleichmäßig abplatteten, ist auch bei großer Schraubenkraft fast immer mindestens ein Spalt nicht geschlossen, womit die Wirksamkeit des formulierten Kriteriums anzuzweifeln ist. Und selbst wenn die ungleichmäßige Abplattung ausgeblendet würde, so zeigen die Drucklastversuche und Anziehversuche, dass das vollständige Abplatten der Überstände durchaus erst bei hohen Vorspannkräften erfolgen kann. Sofern keine Anforderung an eine zulässige Maximalkraft für das vollständige Abplatten der Überstände im Rahmen der Eignungsprüfung für den DTI formuliert ist, ist auch bei sorgfältigster Sichtprüfung ein übermäßiges Anziehen nicht feststellbar.

Der Drucklastversuch müsste – wie im erweiterten Prüfablauf geschehen – über den Anstieg des Gradienten beim Schließen der Spalte hinaus fortgesetzt werden. Die Spalt-Druckkraft-Kurve müsste zudem kontinuierlich aufgezeichnet werden, um die erforderliche Druckkraft zum vollständigen Abplatten der Überstände im Nachgang des Versuchs bestimmen zu können. Wie bereits erläutert könnte im Gegenzug bei vollständiger Aufzeichnung und nachgeschalteter Auswertung des Drucklastversuchs der erste Schritt zum Abgleich der Lehre bzw. des Wegaufnehmers entfallen.

Die festgestellte Druckkraft zum Schließen der Spalte am Knickpunkt der Kurve dürfte die untere zulässige Grenze der Schraubenkraft von  $0,9 f_{ub} A_s$  nicht überschreiten. Angesichts der experimentellen Ergebnisse ist dies gegenüber dem

tatsächlichen Last-Spalt-Verhalten beim Anziehen eine konservative Vorgehensweise.

Der Anziehversuch an der Garnitur mit DTI zum Nachweis des ausreichenden Weiterdrehwinkels  $1,1 \Delta\theta_{2,i \min}$  ist bereits Bestandteil der Gebrauchseignungsprüfung. Falls eine – möglichst automatische – Messtechnik zur Detektion des vollständigen Schließens der einzelnen Spalte zur Verfügung stünde, könnte innerhalb des ununterbrochenen Anziehens die erforderliche Schraubenkraft zum vollständigen Abplatten der Überstände unter realen Bedingungen bestimmt werden. Ob die Entwicklung und Anwendung einer entsprechenden Messtechnik ausreichenden wirtschaftlichen Nutzen bringt, bleibt zu klären.

Behelfsweise wäre zu klären, ob der Anstieg des Gradienten beim Schließen der Spalte mit hinreichender Genauigkeit in der Drehwinkel-Schraubenkraft-Kurve nachzuvollziehen ist. Hier dürften in ungünstigen Konstellationen allerdings die Klemmlänge sowie die reibungsbeeinflusste Streckgrenze der Schraubengarnitur die Analyse erschweren. Bild 2.23 zeigt, dass zwischen den Kurvenverläufen identischer Garnituren mit und ohne DTI zumindest in einem kurzen Abschnitt identische Gradienten vorhanden sind.

Ebenfalls in Erwägung zu ziehen ist eine zweiteilige Prüfung an jeweils mehreren Garnituren. Die ohnehin erforderlichen Prüfungen an der Garnitur mit DTI zum Nachweis des Weiterdrehwinkels müssten hinsichtlich des Drehwinkels  $\Delta\theta_{1,i}$  ausgewertet werden. Dieser ist zwar in den Produktnormen mit Grenzwerten angegeben. Diese sind allerdings nicht als Nachweiskriterium festgelegt.

Aus dem niedrigsten ermittelten Winkel  $\Delta\theta_{1,i}$  ist ein Anteil zu bestimmen, z. B. die Hälfte  $0,5 \Delta\theta_{1,i \min} = \Delta\theta_{3,\max}$  für den in weiteren Anziehversuchen das Anziehen zu beenden wäre, so dass mit einer festzulegenden Fühllehre, z. B. 0,03 mm, das vollständige Schließen aller Spalte zu überprüfen ist. Ist dem nicht so, ist die Prüfung nicht bestanden.

Der Faktor 0,5 muss in geeigneter Weise definiert werden. Dies kann auch in Abhängigkeit der Klemmlänge geschehen. Beide Teile der Prüfung – Bestimmung von  $\Delta\theta_{1,i}$  und Anziehen bis  $\Delta\theta_{3,\max}$  – müssen in derselben Prüfvorrichtung durchgeführt werden, da die Steifigkeit der Vorrichtung die Winkelzählung beeinflussen kann.

Damit wäre allerdings erst nachgewiesen, dass der Spalt überhaupt geschlossen werden kann, ohne vorzeitig den Bruch der Garnitur herbeizuführen. Eine Kontrollmöglichkeit gegenüber übermäßigem Anziehen besteht nicht. Ob und in wel-

chem Maße diese eventuell entbehrlich sein kann, ist im Kontext der weiteren Überlegungen in Kapitel 6.6 zu prüfen.

Es ist zusammenfassend festzuhalten, dass eine Kontrolle auf übermäßiges Anziehen bei Verwendung von direkten Kraftanzeigern unter den gegebenen Umständen nicht möglich ist, da

- eine Sichtprüfung aufgrund mangelnder allseitiger Zugänglichkeit womöglich nicht durchführbar ist,
- das ungleichmäßige Abplatten der Überstände auch unter großer Schraubenkraft mindestens einen geöffneten Spalt bestehen lassen kann und
- keine zulässige Maximalkraft im Rahmen der Gebrauchseignungsprüfung für das vollständige Abplatten der Überstände gefordert ist.

Das formulierte Kriterium aufgrund der mangelnden Wirksamkeit ersatzlos entfallen zu lassen, wäre allerdings nicht sinnvoll. Es darf auf keinen Fall unter den gegebenen Umständen der Eindruck erweckt werden, dass das vollständige Abplatten der Überstände als besonderes Qualitätsmerkmal betrachtet und zur entsprechenden Regelausführung wird. Es würde sich allerdings positiv auf den Erhalt der Vorspannkraft auswirken.

Die britische Sonderregel, vgl. Kapitel 3.6, beinhaltet den richtigen Ansatz, einen Nachweis für die Eignung zum Schließen der Spalte zu fordern. Die Interpretation eines Herstellers offenbart allerdings, dass es einer verbindlichen Festlegung zur Durchführung und der Annahmekriterien bedarf.

## **6.5 Eignung des DTI für den Einsatz in zugbeanspruchten Verbindungen**

Theoretische Überlegungen sowie die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen führen zu der Erkenntnis, dass direkte Kraftanzeiger unter den bestehenden Regeln – sowohl unter Berücksichtigung der zugesicherten Eigenschaften des DTI im Rahmen der Gebrauchseignungsprüfung (EN 14399-9) als auch unter Berücksichtigung der derzeitigen Regeln für die Berechnung und Bemessung (EN 1993-1-8) – für den Einsatz in zugbeanspruchten Verbindungen der Kategorie E (*Zielebene I*) nicht geeignet sind. Darüber hinaus ist ebenso für Verbindungen der Kategorien B und C (*Zielebene I*) mit zusätzlicher Zugbeanspruchung die Anwendung von direkten Kraftanzeigern nicht geeignet, da die dauerhafte Erhal-

tung der Vorspannkraft unter den gegebenen Voraussetzungen nicht zuverlässig gewährleistet ist.

Die vorliegenden experimentellen Untersuchungen haben sich auf die Nenn-durchmesser M16 und M20 in den Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9 jeweils eines Herstellers beschränkt. Aufgrund der großen Spielräume bei den Abmessungen und Werkstoffeigenschaften haben die Hersteller im Rahmen der normativen Regeln die Freiheit, das Last-Verformung-Verhalten verschiedenartig zu gestalten, da nur die einzelne Eigenschaft – Druckkraft bzw. Schraubenkraft – bei einem Spalt von 0,4 mm bzw. 0,25 mm nachzuweisen ist. Dadurch kann das Verformungsverhalten, das zu Vorspannkraftverlusten führt, sowohl günstiger als auch ungünstiger ausfallen.

Es ist zur Kenntnis zu nehmen, dass die Höhe des verbleibenden Spaltes für alle Nenndurchmesser auf maximal 0,4 mm begrenzt ist. Dadurch ist das Potential zur Entstehung von Vorspannkraftverlusten in Abhängigkeit vom Nenndurchmesser und der Klemmlänge zu beurteilen.

Für eine umfassende Beurteilung der Verwendbarkeit von direkten Kraftanzeigern unter Zugbeanspruchung sind weitere Untersuchungen erforderlich. Es ist allerdings ausgeschlossen, dass die Beurteilung der Verwendbarkeit in Abhängigkeit von einzelnen Durchmessern oder Herstellern unterschiedlich vorgenommen werden kann. Daher ist trotz des begrenzten Prüfumfangs nicht davon auszugehen, dass die Empfehlung grundsätzlich geändert werden muss.

Um die Verwendung von direkten Kraftanzeigern in Verbindungen der Kategorien B und C nicht gänzlich auszuschließen, sind allerdings Änderungen in den Regelwerken zur Berechnung und Bemessung vorzunehmen, entweder in allgemeiner Gültigkeit, oder auf die Anwendung von direkten Kraftanzeigern beschränkt.

## **6.6 Allgemeine Weiterentwicklung der Regelwerke**

Besondere Anmerkungen und Empfehlungen hinsichtlich der Weiterentwicklung der Regelwerke wurden zuvor insbesondere für EN 14399-9 und die korrespondierenden Teile in EN 1090-2 gegeben. Die vorliegenden Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass darüber hinaus Weiterentwicklungen von EN 1090-2 wünschenswert, wenn nicht sogar erforderlich sind.

Es ist deutlich sichtbar, dass die Produktnormenreihe EN 14399 in ihrer Vielfalt von unterschiedlichen Traditionen, Erfahrungen und Interessen geprägt ist.



Die Einigung auf die Normenreihe war letztendlich durch die Aufrechterhaltung gleichberechtigter Vielfalt möglich. Diese gleichberechtigte Vielfalt zeigt sich dementsprechend auch in den Verfahren und Anforderungen von EN 1090-2, die wiederum zu einem einheitlichen Ergebnis führen sollen: dem Erreichen der Mindestvorspannkraft mit definierter Zuverlässigkeit.

Über diesen Punkt hinaus sind keine weiteren individuellen Voraussetzungen zur Verwendung der unterschiedlichen Verbindungselemente mit den unterschiedlichen Vorspannverfahren angedeutet, kommentiert oder festgelegt. Daher ist eine einfache Schnittstelle zwischen der Bemessung und Konstruktion (EN 1993-1-8) und der Ausführung (EN 1090-2) gegeben, die scheinbar keinerlei Interaktion benötigt: die Mindestvorspannkraft. Dass dem nicht so ist, haben die vorliegenden Untersuchungen am Beispiel des Vorspannverfahrens mit direkten Kraftanzeigern gezeigt.

Für die Weiterentwicklung des Eurocodes – bestehend aus EN 1993-1-8, EN 1090-2 und EN 14399 – bestehen hinsichtlich vorgespannter geschraubter Verbindungen zwei Möglichkeiten:

- entweder bleibt es bei der vorhandenen gleichberechtigten Vielfalt der Verbindungselemente und Vorspannverfahren unter der Voraussetzung, dass die Regeln der Bemessung so angepasst werden, dass ein einheitlicher Satz von Nachweiskriterien den Anforderungen aller Produkte und Verfahren gerecht wird, indem die ungünstigsten Eigenschaften einzelner, das Maß für alle sind,
- oder es wird eine differenzierte Beurteilung und Bewertung der einzelnen Vorspannverfahren vorgenommen, so dass bei Bedarf den einzelnen Verfahren besondere Bemessungsregeln zugeordnet werden können oder deren Verwendung für bestimmte Beanspruchungssituationen eingeschränkt oder ausgeschlossen werden kann.

Augenscheinlich wird die zweite Alternative die bestehende Einheit – ohne die Benachteiligung einzelner – gefährden und daher wenig Unterstützung finden, obwohl sie die technisch und wirtschaftlich sinnvollere Alternative ist.

Dabei ist die Benachteiligung einzelner schon jetzt Realität, geregelt über die jeweiligen Nationalen Anhänge: in Deutschland sind direkte Kraftanzeiger ohne gesonderten Verwendbarkeitsnachweis nicht einsetzbar, in Großbritannien ist für alle Verbindungen mit HV-Garnituren der Bemessungswert der Mindestvor-

spannkraft  $F_{p,Cd}$  mit  $\gamma_{M7} = 1,1$  anzuwenden. Für alle anderen vorgespannten Garnituren, d.h. HR- und HRC-Garnituren, ist hingegen  $\gamma_{M7} = 1,0$  entsprechend *NA to BS EN 1993-1-8:2005* [BSI08] zugelassen.

Die „Benachteiligung“ kann allerdings durch die konsequente Einführung und Verankerung einer Kategorisierung des Zwecks der auszuführenden Vorspannung kompensiert werden und daher doch für Akzeptanz sorgen. Vorbild dazu ist die Einteilung der Vorspannung in die *Zielebenen I* und *II* nach SCHMIDT [SS11]. Andere Anwendungsbereiche der Schraubtechnik liefern in ihren Regelwerken ebenso Anregungen für eine Ausgestaltung. Die Vorzüge dieser Differenzierung kann anhand von zwei Beispielen herausgestellt werden.

In Deutschland gab und gibt es im Zuge der Einführung von EN 1090-2 intensive Diskussionen über die auszuführende Höhe der Mindestvorspannkraft, die damit verbundene Wahl der (verfügbaren) Verbindungselemente bzw. Anziehverfahren und die Anforderungen an die Kontrolle der vorgespannten Verbindungen. Letztendlich wurde über die Regeln des Nationalen Anhangs DIN EN 1993-1-8/NA die vielfach bewährte und verbreitete Anwendung des (modifizierten) Drehmomentverfahrens in Kombination mit den ausschließlich in *k*-Klasse K1 verfügbaren HV-Garnituren ermöglicht, indem die auszuführende Mindestvorspannkraft im Vergleich zu EN 1993-1-8 herabgesetzt bzw. auf dem ehemaligen deutschen Niveau erhalten wurde.

Selbstverständlich ist eine möglichst große Vorspannkraft generell zu bevorzugen. Für den größten Anteil der mit Vorspannung ausgeführten Verbindungen hat die Reduzierung aber keine ernsthaften Nachteile. In den Kategorien A und D wird die Vorspannkraft weder für einen Nachweis benötigt, noch ist die verminderte Größe nachteilig, da die Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit durch die Minimierung von Schlupf und Klaffung beabsichtigt wird.

Mit einer Festlegung von Zielebenen für die Vorspannung und der deutlichen Zuordnung dieser Zielebene zur entsprechenden Verbindung lassen sich sehr leicht und nachvollziehbar alle Anforderungen bündeln, die gegebenenfalls von den höchsten Anforderungen nach EN 1090-2 abweichen. Ausführende Unternehmen können wirtschaftliche Entscheidungen bezüglich der einzusetzenden Anziehwerkzeuge und Verbindungselemente treffen, Prüfer können die Kontrollen zielgerichtet durchführen.

In Großbritannien hat es offenbar ebenfalls Änderungsbedarf an den festgelegten Regeln für vorgespannte Verbindungen nach EN 1090-2 gegeben. Für den bevor-

zugten Einsatz des Verfahrens mit direkten Kraftanzeigern wurden die Kontrollanforderungen herabgesetzt und die Kriterien zur Zurückweisung und zum Austausch der Garnitur großzügiger gefasst, die höheren Anforderungen nach EN 1090-2 können aber weiterhin vereinbart werden, vgl. Kapitel 3.6.

Mit dem Wissen, dass in Großbritannien nur HR-Garnituren der *k*-Klasse K0 vertrieben und eingesetzt werden und diese nach EN 1090-2 nur mit dem Verfahren mit DTI eingesetzt werden dürfen, liegt die Schlussfolgerung nahe, dass die Sicherheitsanforderungen grundsätzlich herabgesetzt wurden. Dem ist nicht so.

In Ergänzung zu den Verfahren nach EN 1090-2 wurde ein weiteres Verfahren, das modifizierte kombinierte Verfahren – nach britischer Art, vgl. Kapitel 3.1.1 – eingeführt, und zwar für den Brückenbau. Das Bewusstsein für den Zweck der Vorspannung und die damit verbundenen Anforderungen ist dementsprechend vorhanden. Vor dem Hintergrund der bevorzugten Verwendung des Verfahrens mit DTI im Hochbau, vermutlich überwiegend in Zielebene II, kann dementsprechend die im Rahmen dieser Arbeit getroffene Empfehlung, direkte Kraftanzeiger nicht in zugbeanspruchten Verbindungen zu verwenden, relativiert werden, falls geeignete Kategorien dafür vorhanden sind, da die Vorspannkraft nicht zwingend für die Bemessung benötigt wird.

Falls sich erweisen sollte, dass die Verbindungen in Großbritannien überwiegend nach dem Vorbild des Brückenbaus als scherbeanspruchte Verbindungen ausgeführt werden, dann sind auch die grundsätzlichen Bedenken gegen das vollständigen Schließen der Spalte zu relativieren. Entsprechende Untersuchungen [SNG99] zeigten die ausreichenden Tragfähigkeiten auch bei übermäßig angezogenen Schrauben. Für zugbeanspruchte Verbindungen ist dies wiederum eigenständig zu beurteilen.

Beide Beispiele zeigen, dass die nationalen Gepflogenheiten beim Einsatz der Verbindungselemente und Anziehverfahren (EN 1090-2) stark auf das Anwendungsgebiet und den Zweck der Vorspannung (EN 1993-1-8) ausgerichtet sind. Entsprechende praxisrelevante Verknüpfungen lassen sich aufgrund der strikten Fokussierung alleine auf die Mindestvorspannkraft an der Schnittstelle zwischen EN 1993-1-8 und EN 1090-2 schwer integrieren.

Anhand der derzeitigen Regeln von EN 1090-2 muss zwangsläufig der Eindruck entstehen, als ob alle Verfahren in allen Anwendungsgebieten gleichberechtigt und gleichwertig verwendbar sind.

Eine Einführung einer Kategorisierung des Zwecks der Vorspannung wäre der erste Schritt, um die Anziehverfahren einer sachgerechten Beurteilung zu unterziehen, die neben den wirtschaftlich auch die technisch sinnvollen Anwendungsbereiche aufzeigt.

Mit diesem Wissen lassen sich die vorhandenen, zuvor genannten „Benachteiligungen“ durch die Nationalen Anhänge ziemlich entspannt betrachten: der in Deutschland geforderte Verwendbarkeitsnachweis für DTI ist wohl kaum vorrangig für den Einsatz in Verbindungen der Kategorien A und D des Hochbaus definiert worden, und für den Brückenbau wird in Großbritannien anscheinend das modifizierte kombinierte Verfahren bevorzugt.

Auf der anderen Seite ist der Bemessungswert der Mindestvorspannkraft für die Kategorien A und D nicht von Bedeutung. Für höchstbeanspruchte Verbindungen in Windenergieanlagen wird gemäß *DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen* [DIBt12] zum einen die Grenzgleitkraft mit einem Faktor von 0,9 abgemindert, zum anderen ist der Ermüdungsnachweis von Verbindungen der Kategorie E ebenso unter Berücksichtigung einer Abminderung auf 90 % der planmäßigen Vorspannkraft zu führen.

## 6.7 Anwendung und Anwendungsbeispiele

Grundsätzlich hat sich im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Auffassung gefestigt, dass direkte Kraftanzeiger bevorzugt in rein scherbeanspruchten Verbindungen – vor allem Laschenverbindungen – eingesetzt werden und eingesetzt werden sollten, so wie es in der Zeit der Erfindung und Entwicklung des DTI der Fall war. Diese Verbindungen sind bei Ermüdungsbeanspruchung – z. B. im Brückenbau – gleitfest vorzuspannen.

Solche Verbindungen bieten die grundsätzlichen Voraussetzungen für die erfolgreiche Einbringung der Vorspannkraft mit dem Verfahren der direkten Kraftanzeiger im Zuge der Montage, nämlich

- die gute Zugänglichkeit – visuell und/oder mit der Fühllehre – zum DTI, um das kontrollierte Vorspannen und die generelle Kontrolle durchführen zu können, im besten Fall mit geringem Zeitaufwand,
- das weitestgehend zwängungsfreie Fügen der Bauteile, das ein Voranziehen bzw. einen ersten Anziehschritt auf geringem Vorspannkraftniveau zulässt,

- geringe Steifigkeitsunterschiede innerhalb der Bauteile an Schraubengruppen, die eine geringe Beeinflussung benachbarter Schrauben beim Anziehen gewährleisten, und
- die vergleichsweise einfache Fixierung der Bauteile mit Dornen, da keine Zugbeanspruchung von temporären oder zu verwendenden Verbindungselementen aufgenommen werden muss.

Für das Verfahren mit direkten Kraftanzeigern sind diese Voraussetzungen auch im Hinblick auf den Betrieb bzw. die Nutzung zu beachten, da

- weder eine besonders hohe Vorspannkraft kontrolliert erzielt werden kann, die Vorspannkraftverluste durch die vorhandenen Reserven gegenüber der Mindestvorspannkraft kompensieren kann – wie es mit dem Drehwinkel- oder kombinierten Verfahren möglich ist –
- noch ein kontrolliertes Nachziehen möglich ist, um die Vorspannung auch nach einer bestimmten Betriebsdauer kontrollieren und gegebenenfalls wiederherstellen zu können – wie es das Drehmomentverfahren ermöglicht.

Die Unabhängigkeit des Verfahrens mit direkten Kraftanzeigern von den Reibungseigenschaften bezüglich des Erreichens der Mindestvorspannkraft stellt insbesondere dann einen Vorteil dar, falls

- keine Garnituren mit definierter Schmierung verfügbar sind und/oder
- keine kalibrierten Anziehgeräte zur Verfügung stehen, die die Erfassung und Verarbeitung des Anziehmomentes ermöglichen.

Dass diese beiden Faktoren die Auswahl des Verfahrens mit direkten Kraftanzeigern nicht zwingend erforderlich machen, zeigt die Anwendung eines modifizierten kombinierten Verfahrens (*part turn method*) in Großbritannien, das ebenso auf die definierte Schmierung verzichten kann und eine geringere Anforderung an die Kalibrierung der Anziehgeräte stellt. Die vollständige Unabhängigkeit von der Kalibrierung des Anziehgerätes ist durch die Verwendung des Drehwinkelverfahrens (*Turn-of-Nut method*) nach nordamerikanischer Definition gegeben, das allerdings ebenso wie das Verfahren mit DTI auf die flächige Anlage der Bauteile bei geringer Vorspannkraft angewiesen ist.

Da die Verwendung des direkten Kraftanzeigers gegenüber der herkömmlichen Garnitur zusätzliche Kosten verursacht, ist die wirtschaftliche Entscheidung über den Einsatz des DTI vor allem von der Geschwindigkeit der Montage abhängig, die durch die visuelle Unterstützung durch farbiges Silikon verbessert wurde. Außerdem ist der Einsatz von vergleichsweise günstigen Impuls- oder Schlagschrauben möglich.

Die technische Entscheidung zur Wahl – unter den beiden vorgenannten Voraussetzungen – zwischen dem Verfahren mit DTI und dem Drehwinkelverfahren ist hingegen vom dauerhaften Erhalt der Vorspannkraft abhängig zu machen. Für beide Verfahren sind die Kontrolle der Vorspannkraft und das Nachziehen zur Wiederherstellung der Vorspannkraft nicht möglich. Die Reserven der höheren Vorspannkraft aus dem Drehwinkelverfahren können hier vorteilhaft sein, sofern diese höhere Vorspannkraft nicht zugleich Ursache für höhere Vorspannkraftverluste ist. Dies ist im Einzelfall in Abhängigkeit von den Oberflächenbehandlungen zu berücksichtigen.

Außerdem bleibt die Gefahr durch Korrosion an offenen Spalten oder der Aufwand diese zu versiegeln als Entscheidungskriterium allgegenwärtig.

Für zugbeanspruchte Verbindungen – auch in Kombination mit Scherbeanspruchung – sollte das Verfahren mit direkten Kraftanzeigern in der derzeitigen Form mit den gegebenen Anforderungen an die Gebrauchseigenschaften der Garnitur mit DTI und den vorliegenden rechnerischen Nachweisformaten nicht angewendet werden. Dies betrifft vor allem die Kategorien von Verbindungen, die die Mindestvorspannkraft im rechnerischen Nachweis berücksichtigen und somit auf den dauerhaften Erhalt angewiesen sind. Dies sind die Kategorien B, C und E mit der Vorspannung entsprechend *Zielebene I*, siehe exemplarisch Bild 6.1.

Ist die Verwendung der Vorspannung nur aus Gründen der Gebrauchstauglichkeit – ohne rechnerische Berücksichtigung – vorgesehen und können Vorspannkraftverluste über die Lebensdauer des Bauwerks toleriert werden, ist der Einsatz des Verfahrens mit direkten Kraftanzeigern in *Zielebene II* für die Kategorien A und D vorstellbar, auch unter Zugbeanspruchung, siehe exemplarisch Bild 6.2.

In Tabelle 6.1 sind die vorgenannten Erläuterungen in vereinfachter Form und Kategorisierung zusammengestellt. Dabei werden die Beanspruchungsarten, die zugehörigen Kategorien für die notwendigen Nachweiskriterien und der Zweck der Vorspannung in Form der *Zielebenen I* und *II* berücksichtigt.

Die eingeschränkte Empfehlung für die Verwendung des Verfahrens mit DTI in *Zielebene II* bei vorhandener Zugbeanspruchung ist im besonderen Maße durch die konstruktiven Randbedingungen geprägt, die in der Regel bei Zugbeanspruchung vorliegen. Es handelt sich dabei vornehmlich um Stirnplatten- oder Flanschverbindungen, die mit möglichst geringen Abständen zu benachbarten Stegen, Flanschen, Steifen oder Blechen auszuführen sind. Die unterschiedlichen Steifigkeiten erschweren ebenso wie auch nötige Korrekturmaßnahmen mit Futterblechen in der Trennfuge der Bauteile das gleichmäßige bzw. mehrstufige Vorspannen mit direkten Kraftanzeigern. Die schematische Darstellung erschwerender Umstände ist in Bild 3.23 gegeben; siehe außerdem exemplarisch Bilder 6.2 (b) und 6.4.

Entsprechende Einflüsse sind in gleicher Art auch für Verbindungen mit einer Vorspannung entsprechend *Zielebene I* vorstellbar, wobei der Einsatz von Futterblechen umso mehr vermieden werden muss. Steifigkeitsunterschiede und gegenseitige Beeinflussung lassen sich allerdings nicht grundsätzlich verhindern, siehe exemplarisch Bild 6.1 (a).

Die eingeschränkte Empfehlung für den Einsatz des Verfahrens mit DTI in Verbindungen der Kategorien B und C (*Zielebene I*) ist nicht von den konstruktiven Randbedingung geprägt, sondern von der Erhaltung der Mindestvorspannkraft über die Lebensdauer des Bauwerks, siehe exemplarisch Bilder 6.1 (b) und 6.3 (c).

Wie zuvor dargelegt, ist derzeit eine Ausführung der geringstmöglichen Mindestvorspannkraft verfahrensbedingt möglich und zulässig, die durch die Änderung der Anforderungen an die Gebrauchseignungsprüfung vergrößert werden kann und muss. Nur so lassen sich unausweichliche Vorspannkraftverluste durch Setzen in allen Kontaktfugen kompensieren. Die vorliegenden Untersuchungen zeigten extrapolierte mittlere Verluste von etwa 9 %, die nur auf den vorhandenen direkten Kraftanzeiger zurückzuführen sind; weitere Einflüsse von beschichteten Oberflächen nicht einbezogen.

Die möglichen Vorspannkraftverluste sind demzufolge innerhalb des Verfahrens mit DTI entgegen der Aussage von EN 1090-2 nicht berücksichtigt.

Unter Umständen kann die zusätzliche Verwendung von direkten Kraftanzeigern auch bei Verfügbarkeit von definiert geschmierten Garnituren und adäquat kalibrierten Anziehwerkzeugen als Kontrollinstrument sinnvoll sein. Für vorgespannte mehrschnittige Passverbindungen mit HVP-Garnituren nach EN 14399-8 kann mit einem direkten Kraftanzeiger unter dem Schraubenkopf kontrolliert werden,

ob die mittels Drehmomentverfahren eingebrachte Vorspannkraft tatsächlich in allen Trennfugen wirksam ist, welches durch das Anliegen der Lochränder an der Schraube vor dem Abschluss des Vorspannens unterbunden sein kann.

Dass die Entscheidung über die Auswahl des Anziehverfahrens nicht allein von der Kategorie der Verbindung bzw. der Zielebene abhängt, veranschaulicht Bild 6.4. Für diese Verbindungen in den Kategorien A und D ist schwer vorstellbar, dass eine Fühllehre mit vertretbarem Aufwand zur Anwendung kommt.

Das konstruktive Prinzip, die Schraube bei Bewitterung von oben nach unten einzustecken, damit keine Feuchtigkeit in das Gewinde eintreten kann, ist hier umgesetzt. Der Einsatz von DTI unter dem Schraubenkopf würde dagegen eine neue Eintrittsmöglichkeit für Feuchtigkeit eröffnen. Die alternative Montagekonfiguration mit DTI unter der Mutter, allerdings nicht sichtbar innerhalb des Rohres, wäre schwerlich ausführbar; auch nicht mit Unterstützung von farbigem Silikon.

**Tabelle 6.1.** Empfehlungen zur Anwendung des Verfahrens mit DTI unter Berücksichtigung der derzeitigen Regelwerke und von konstruktiven Randbedingungen

**Table 6.1.** Recommendations for the use of the DTI method taking into account the current rules and regulations as well as structural design conditions

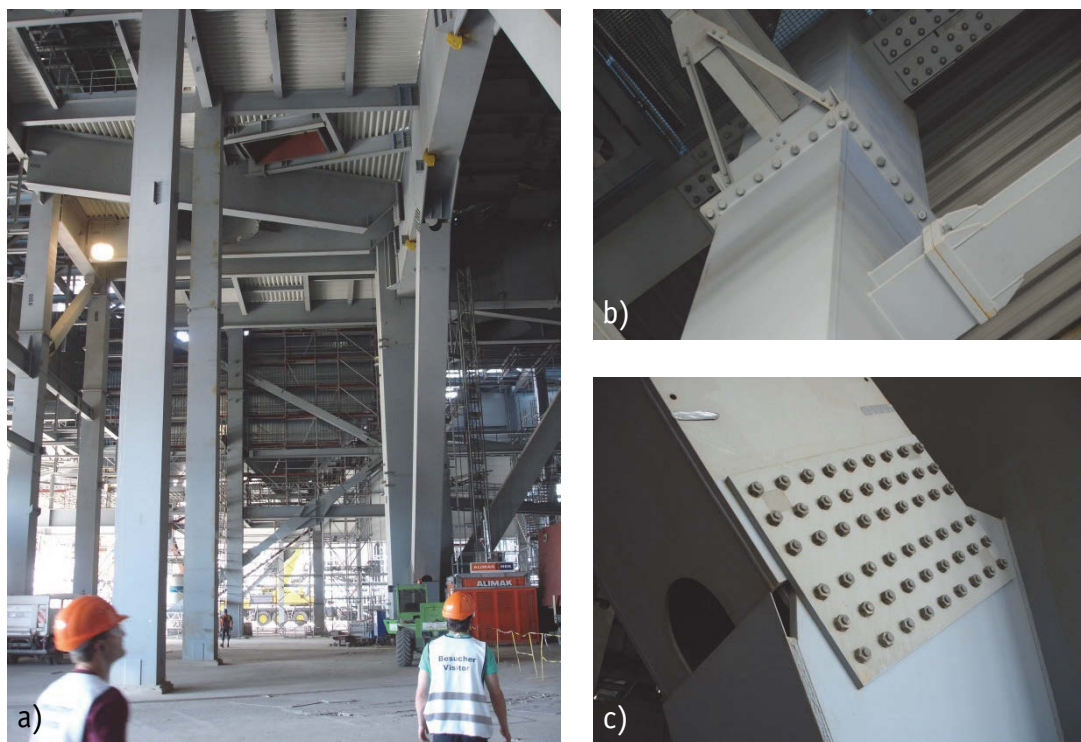
Anwendung des Verfahrens mit direkten Kraftanzeigern (DTI) nach Eurocode										
	Beanspruchung	Abscheren			Abscheren und Zug (kombiniert)				Zug	
Zielebene	Kat.	A	B	C	A-D	A-E	B-E	C-E	D	E
Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit	II				M				M	
Erhöhung der Tragsicherheit	I		N	N		MN	MN	MN		MN
M (Montage): Einschränkungen durch Zugänglichkeit, Herstellungs- und Montagetoleranzen sowie gegenseitige Beeinflussung in Gruppen möglich										
N (Nutzung): Erhaltung der Mindestvorspannkraft gefährdet durch Setzen und/oder Zugbeanspruchung										
ohne Bedenken		möglich mit Einschränkungen				zu vermeiden				





**Bild 6.1.** Behelfsbrücke, Vinckekanal Duisburg

**Figure 6.1.** Temporary bridge, Vincke canal Duisburg



**Bild 6.2.** Kesselgerüst, Kraftwerk Neurath

**Figure 6.2.** Main steel structure, power station Neurath



**Bild 6.3.** Tragmast, Seilbahn Koblenz

**Figure 6.3.** Supporting mast, cable car Koblenz

Die berücksichtigten und veranschaulichten Einflüsse für die Zusammenstellung von Tabelle 6.1 *für* oder *gegen* den Einsatz des Verfahrens mit direkten Kraftanzeigern sind selbstverständlich auch für die Auswahl eines anderen Anziehverfahrens in geeigneter Weise zu bedenken bzw. zu überprüfen.

Die Vorteile und Nachteile des Verfahrens mit direkten Kraftanzeigern wurden zuvor benannt. Somit kann eine zweckdienliche Entscheidung über den Einsatz des Verfahrens mit direkten Kraftanzeigern entsprechend EN 1090-2 getroffen werden.





**Bild 6.4.** Inspektion und Instandsetzung, Landmarke „Der Tetraeder“ Bottrop, Fotos (a), (b) und (c) © Constantin Verwiebe, (d) und (e) © Christina Renner

**Figure 6.4.** Inspection and maintenance, landmark “Der Tetraeder” Bottrop, photos (a), (b) and (c) © Constantin Verwiebe, (d) and (e) © Christina Renner



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Das Verfahren mit *direkten Kraftanzeigern* (engl. *Direct Tension Indicator*, DTI) ist eines von mehreren nach EN 1090-2 angebotenen und geregelten Anziehverfahren zum Vorspannen von hochfesten Schraubengarnituren im Stahlbau. Zusammen mit den verwendbaren Schraubengarnituren großer Schlüsselweite nach EN 14399 haben die Anziehverfahren unter Berücksichtigung der spezifischen Anziehparameter sicherzustellen, dass die Mindestvorspannkraft in die Verbindung sicher und zuverlässig eingebracht wird. Entsprechende Kontrollen haben dies zu bestätigen.

Die Vorspannkraft kann aus Gründen der Tragsicherheit in scherbeanspruchten Verbindungen der Kategorien B und C erforderlich sein, um die gleitfeste Verbindung herzustellen. Unter Zugbeanspruchung in der Kategorie E unterliegen hochfeste vorgespannte Schraubengarnituren oftmals wechselnden Ermüdungsbeanspruchungen, die in der Wirkung auf die Schraube aufgrund der Vorspannung soweit verringert sind, dass das stark gekerbte Bauteil Schraube beachtliche Lasten ertragen und Lebensdauern gewährleisten kann. Für beide Arten von Verbindungen ist die Einbringen und Erhaltung der Vorspannkraft sicherheitsrelevant. Sie werden daher der *Zielebene I* zugeordnet.

Schraubenverbindungen, deren Berechnung und Bemessung ohne die rechnerische Berücksichtigung der Vorspannkraft auskommen, werden der *Zielebene II* zugeordnet. In den Kategorien A für scherbeanspruchte und D für zugbeanspruchte Verbindungen kann eine Vorspannung ausgeführt werden, um Schlupf und Klaffen zu verhindern. Sie dient somit der Gebrauchstauglichkeit.

Direkte Kraftanzeiger sind Scheiben, die an einer Auflagefläche herausgestanzte Überstände aufweisen. Innerhalb der Schraubengarnitur ist der direkte Kraftanzeiger mit den Überständen gegen gehärtete Auflageflächen auszurichten, zumeist Scheiben besonders hoher Härte. Durch das Anziehen der Garnitur werden die Überstände plastisch gestaucht. Aufgrund des bekannten und kalibrierten Zusammenhangs zwischen der Höhe der Überstände bzw. der Höhe der Spalte zwischen den Überständen und der dazu erforderlichen Druckkraft ist mittels festgelegter Fühllehren zu kontrollieren, ob der Spalt ausreichend weit geschlossen ist.

Dann soll die erforderliche Mindestvorspannkraft erreicht sein. Das vollständige Schließen der Spalte ist zu verhindern, damit ein übermäßiges Anziehen mit einer Schädigung der Verbindungselemente vermieden wird.

Der Einsatz von direkten Kraftanzeigern ist in Deutschland weitestgehend unbekannt. Durch die Zusammenführung unterschiedlichster Verbindungselemente und Anziehverfahren in EN 1090-2 und EN 14399 ist das Verfahren – gleichberechtigt mit allen anderen Verfahren – theoretisch auch in Deutschland anwendbar. Aufgrund von mangelnder Anwendungserfahrung wurde es allerdings über den Nationalen Anhang DIN EN 1993-1-8/NA ausgeschlossen.

Für dieses in Deutschland unbekannte Anziehverfahren wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein allgemeines Verständnis über das Last-Verformungsverhalten des direkten Kraftanzeigers sowie über das Tragverhalten der vorgespannten Verbindung mit direktem Kraftanzeiger gewonnen. Darüber hinaus wurde überprüft, ob in einer mittels DTI vorgespannten Verbindung der Erhalt der Vorspannkraft auch bei axialer zentrischer Zugbeanspruchung gewährleistet ist. Eine solche Beanspruchung ist nach EN 1993-1-8 ohne besondere Einschränkungen zugelassen. Die experimentellen Untersuchungen bestanden aus Drucklastversuchen an direkten Kraftanzeigern – als alleinige Produktprüfung – sowie Anziehversuchen an Garnituren mit direkten Kraftanzeigern, um das Erreichen der Mindestvorspannkraft unter Anwendung der Fühllehre zu überprüfen. Vorgespannte Bauteile, für die die Vorspannkraft mit Hilfe der Fühllehre eingebracht wurde, ermöglichten unter Zugbeanspruchung die Beobachtung der vorhandenen Schraubenkraft und von Vorspannkraftverlusten.

Der direkte Kraftanzeiger wurde 1962 in Großbritannien erfunden, erlangte dort Verbreitung und Anwendung, und wurde schließlich 1972 auch in Nordamerika hergestellt und vertrieben. Die Entwicklung und ursprüngliche Anwendung fällt in die Zeit, in der die Schraubtechnik zur Herstellung gleitfester Verbindungen mit hochfesten vorgespannten Schrauben erforscht und weiterentwickelt wurde. Die Anwendung des DTI erfolgte daher vornehmlich in scherbeanspruchten Verbindungen.

Eine überwiegende Anzahl verfügbarer wissenschaftlicher Untersuchungen – vornehmlich aus Nordamerika – beschäftigte sich auch in jüngerer Vergangenheit mit der zuverlässigen Einbringung der Mindestvorspannkraft. Dabei war zusätzlich die Problemstellung zu klären, ob das vollständige Schließen der Spalte zugelassen werden sollte, da es die Handhabung des Verfahrens wesentlich erleichtern

würde. Obwohl die ermittelten Tragfähigkeiten von übermäßig angezogenen, scherbeanspruchten Schrauben keinen Grund zur Sorge bereiteten, wurde das vollständige Schließen der Spalte dennoch in Nordamerika nicht zugelassen.

Eine einzige Publikation – britischen Ursprungs – widmet sich der Fragestellung nach der Eignung des direkten Kraftanzeigers unter Zugbeanspruchung. Die vergleichenden Untersuchungen an T-Stummel-Verbindungen lieferten die Erkenntnis, dass die Verbindungen mit DTI unter exzentrischer Zugbeanspruchung – einschließlich Abstützkräften – keine höheren Vorspannkraftverluste erleiden, als gleichartige Verbindungen mit vorgespannten Schrauben ohne DTI. Das Ergebnis kam deshalb zustande, weil die Garnituren ohne DTI an selbiger Stelle unter dem Kopf keine gehärtete Scheibe vorliegen hatten. Die plastischen Verformungen der Überstände des DTI waren also mit den plastischen Verformungen des Lochrandes in der Weise gleichartig, als dass sie ähnlich große Vorspannkraftverluste von bis zu 40 % verursachten. Dies wohlgedacht bei einer Belastung, die oberhalb des damals zulässigen Niveaus der 0,6-fachen Mindestvorspannkraft lag.

Die Aufarbeitung des damaligen und heutigen Standes der Regelwerke zeigt die Entwicklung der zulässigen Zugbeanspruchung von hochfesten vorgespannten Schraubenverbindungen. Die Normung spiegelte anfangs die Vorsicht gegenüber der geringeren Duktilität hochfester Schrauben wieder, indem die zulässige Zugbeanspruchung bei der 0,6-fachen Mindestvorspannkraft begrenzt war. Auch aufgrund von werkstofflichen Entwicklungen liegt die zulässige Zugbeanspruchung heute bei der 1,03-fachen Mindestvorspannkraft für vorgespannte Verbindungen. Dies ist nicht die eigentliche Definition, sondern die Ableitung aus den zugrundeliegenden Bemessungsniveaus von Festigkeit und Vorspannkraft. Damit war die Normung zur alleinigen Definition des Grenzzustandes der Tragfähigkeit übergegangen, ohne ein Nachweiskriterium der Gebrauchstauglichkeit der vorgespannten Verbindung verbindlich vorzuschreiben. Bei Überschreiten der Vorspannkraft ist nämlich das Klaffen der Verbindung zu befürchten.

Wenige kritische Stimmen in der Literatur weisen auf die besonderen Gefahren einer zu hohen Zugbeanspruchung für Verbindungen mit DTI hin, da das große Potential für mögliche Vorspannkraftverluste durch weiteres Abplatten der Überstände gegeben ist.

Die experimentellen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit an einer Auswahl marktgängiger DTI in den Nenndurchmessern M16 und M20 sowie den Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9 umfassten die folgenden drei Versuchstypen:

- Drucklastversuche nach EN 14399-9 (Unterkapitel 4.3),
- Anziehversuche nach EN 14399-2 und -9 (Unterkapitel 4.4) und
- Bauteil-Zugversuche mit vorgespannten Garnituren (Unterkapitel 4.5).

Es wurde mit der eigentlichen Produktprüfung für den einzelnen direkten Kraftanzeiger, dem Drucklastversuch, begonnen. Bei einem Spalt von 0,4 mm ist die zugehörige Druckkraft im Bereich der 1,0- und 1,2-fachen Mindestvorspannkraft nachzuweisen. Vier der fünf untersuchten unterschiedlichen Lose der direkten Kraftanzeiger bestanden die Prüfung. In der Serie M16–H10 lagen zwei unterschiedliche Herstellungslose vor, von denen eines die Drucklastprüfung nicht bestanden hatte. Es wurde in die weiteren Prüfungen trotzdem einbezogen, um die Konsequenzen für die Anwendung sichtbar zu machen.

Die anschließenden Anziehversuche an HV-Garnituren mit DTI wurden in zwei unterschiedlichen Schmierzuständen der Muttern durchgeführt. Die Muttern wurden dazu sowohl im werksseitig geschmierten Zustand der *k*-Klasse K1, als auch im ungeschmierten, vom Gewindeschneiden leicht öligen Zustand verwendet. Dabei handelt es sich um eine identische Fertigungscharge.

Da direkte Kraftanzeiger die Vorspannkraft ohne den Einfluss der Reibungseigenschaften anzeigen können und grundsätzlich als Bestandteil von Garnituren mit der Kennzeichnung der *k*-Klasse K0 auszuliefern sind, könnte daraus der Eindruck entstehen, dass der Schmierung keine besondere Bedeutung zukommt und so eine sorglose Behandlung mit Verschlechterung der werksseitigen Schmierung ohne Folgen bleibt. Dass dem nicht so ist, zeigen die Anziehversuche. Ohne Schmierung sind die Gebrauchseigenschaften der Garnitur soweit eingeschränkt, dass das Mindestniveau der Schraubenkraft nicht erreicht wird und der Bruch der Garnitur bei vergleichsweise kleinem Drehwinkel auftritt. Die geforderten Produkteigenschaften können ohne Schmierung nicht sichergestellt werden, so dass auch den Garnituren der *k*-Klasse K0 eine sorgsame Behandlung hinsichtlich der Erhaltung der Schmiereigenschaften zu Teil werden muss.

Das Anziehen unter Berücksichtigung des Fühllehren-Kriteriums, d.h. unter Anwendung einer festgelegten Fühllehre und dem Abzählen der Zurückweisungen – d.h. des Nicht-Eindringens – an den Spalten hat gezeigt, dass zwei Lose die geforderte Mindestvorspannkraft nicht erfüllt haben. Es handelt sich jeweils um



die Montagekonfiguration des DTI unter dem Schraubenkopf bei gleichzeitigem Drehen der Mutter. Bei Anordnung des DTI unter der gedrehten Mutter konnten die jeweiligen Lose die Anforderung unter Berücksichtigung der normativ festgelegten Fühllehre – hier 0,25 mm anstelle von 0,4 mm – erfüllen. Dasjenige Los, welches den Drucklastversuch nicht bestanden hat, konnte auch im Anziehversuch die Anforderungen nicht annähernd erfüllen.

Als dritter Versuchstyp wurden die Bauteil-Zugversuche mit Hilfe von instrumentierten Schrauben durchgeführt, so dass mittels eines axial zentrisch eingegossenen Dehnungsmessstreifens die Schraubenkraft während des Anziehens und unter Betriebsbeanspruchung im Zugversuch kontinuierlich aufgezeichnet werden konnte. Diese Messtechnik war erforderlich, um eine möglichst geringfügige Änderung der Steifigkeitsverhältnisse der Schraube und des kompletten Klemmpakets zu gewährleisten.

Die axial zentrische Zugbeanspruchung wurde in ansteigenden Laststufen aufgebracht, die jeweils von einer nahezu vollständigen Entlastung unterbrochen sind. So konnte die maximale Schraubenkraft – Vorspannkraft zuzüglich Schraubenzusatzkraft – sowie der Vorspannkraftverlust – minimale Schraubenkraft im vorletzten Lastschritt abzüglich minimaler Schraubenkraft im aktuellen Lastschritt – bestimmt werden.

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Lose zeigen eine eindeutige Relation zwischen der erreichten Montagevorspannkraft und den Vorspannkraftverlusten, die aus einem einzelnen Lastwechsel mit der zulässigen Axialkraft  $F_A = F_{t,Rd}$  stammen. Je weiter die Betriebsbeanspruchung die bei der Montage erzielte Vorspannkraft überschreitet, umso größer sind die Vorspannkraftverluste, die durch fortschreitende plastische Verformung der Überstände des DTI entstehen. Dass der DTI eindeutig ursächlich dafür ist, zeigen gleichartige Zugversuche an vorgespannten Verbindungen ohne DTI. Bei einem Überschreiten der Montagevorspannkraft um etwa 6 % waren mit DTI Vorspannkraftverluste von 43 % festzustellen, bei vergleichbaren Lastniveaus für Verbindungen ohne DTI lediglich solche von 1,8 %.

Mit den verfügbaren Last-Verformung-Kurven aus den Drucklastversuchen konnte das Verspannungsschaubild für die vorgespannte Schraubenverbindung um die elastischen und plastischen Eigenschaften der vorliegenden DTI erweitert werden. Somit können zum einen die bestehenden Zugversuche auf Grundlage von VDI 2230-1 hinsichtlich der Schraubenzusatzkräfte und Vorspannkraftver-

luste nachgerechnet werden, zum anderen die geometrischen Grenzen der vorliegenden Versuche um unzählige weitere Varianten mit unterschiedlichen Schrauben und Klemmlängen erweitert werden. Dazu wurden die Steifigkeitseigenschaften von HV- und HR-Garnituren sowie diejenigen von Schrauben mit durchgehendem Gewinde berücksichtigt. Die Klemmlängen wurden im genormten Bereich der Standardlängen von HV-Schrauben variiert. Abweichende Durchmesser konnten nicht untersucht werden. Dazu werden die Last-Verformung-Kurven der jeweiligen direkten Kraftanzeiger benötigt, da die Gestaltung des DTI auch innerhalb der geregelten Abmessungen vielfältig sein kann.

Das mechanische Modell auf Grundlage des Verspannungsschaubildes gemäß VDI 2230-1 hat für die Zugversuche in der Montagekonfiguration mit DTI unter dem Schraubenkopf und gedrehter Mutter eine gute Übereinstimmung zu den Versuchen hinsichtlich der Vorspannkraftverluste aus dem Verhalten des DTI bei Laststeigerung gezeigt. Vorspannkraftverluste aus anderen Phänomenen, z. B. aus gleich großen wiederholten Lastwechseln oder klaffender Trennfuge, kann das Modell nicht abbilden. Solche Vorspannkraftverluste müssten ggfs. anhand von weiteren experimentellen Untersuchungen systematisch bestimmt werden und dem Modell zugeführt werden.

Die Untersuchung von Fallbeispielen anhand von unterschiedlich großen Montagevorspannkraften, Beanspruchungsniveaus und Klemmlängen hat ergeben, dass eine Begrenzung der einwirkenden Zugkraft auf die etwa 0,6- bis 0,7-fache Mindestvorspannkraft die aus dem Verformungsverhalten des DTI resultierenden Vorspannkraftverluste auf weniger als 5 % der Mindestvorspannkraft begrenzen kann. Bei einer vorausgesetzten Montagevorspannkraft der 1,1-fachen Mindestvorspannkraft ist dadurch der Erhalt der Mindestvorspannkraft gegeben. Weitere Einflüsse auf Vorspannkraftverluste, die das Modell nicht abbilden kann, sind dringend zusätzlich zu beachten.

Anhand der experimentellen Untersuchungen und der Modellberechnungen konnte gezeigt werden, dass der Erhalt der Vorspannkraft unter Zugbeanspruchung stark vom Niveau der Montagevorspannkraft abhängig ist. Da die derzeitigen Gebrauchseignungsprüfungen im Rahmen der Anforderungen nur die Einbringung der einfachen Mindestvorspannkraft gewährleisten, sind die zulässigen Zugbeanspruchungen für vorgespannte Verbindungen mit DTI im Rahmen der Bemessung nach EN 1993-1-8 zu reduzieren. Anderenfalls kann nur generell vom Einsatz des Verfahrens mit DTI in zugbeanspruchten Verbindungen abgeraten werden.

## 7.2 Ausblick

Im Rahmen der gewonnenen Erfahrungen mit der Prüfung und Anwendung von direkten Kraftanzeigern konnten Verbesserungsvorschläge für die Normen EN 14399-9 und EN 1090-2 formuliert werden, die besonders die Beschreibung des Prüfverfahrens und der Anwendungsregeln beinhalten. Insbesondere muss darauf hingewirkt werden, dass die Randbedingungen zur Durchführung von Anziehversuchen mit Anwendung des Fühllehren-Kriteriums zur Anzeige der Mindestvorspannkraft präzise beschrieben werden, da dem Anziehversuch im Gegensatz zum Drucklastversuch die weitaus größere Bedeutung zukommt. Darüber hinaus sind ebenso die derzeitig geregelten geometrischen Abmessungen anzupassen, so dass eine störungsfreie Durchführung des vorgeschriebenen Drucklastversuchs möglich ist.

Um dem Streben nach der Zulässigkeit des vollständigen Schließens aller Spalte zu begegnen, wurde die Integration eines weiteren Gebrauchseignungskriteriums vorgeschlagen. Die nötigen Parameter sind in geeigneter Weise festzulegen und experimentell abzusichern. Eine Überarbeitung und Erweiterung des Drucklastversuchs könnte im Hinblick auf das vollständige Schließen der Spalte zusätzliche konservative Gebrauchseignungskriterien liefern. Diese sind gegebenenfalls mit der alternativen Erweiterung des Anziehversuchs zu vergleichen, so dass eine konservative und einfache Versuchsdurchführung festgeschrieben werden kann.

Grundsätzlich ist unter den gegebenen Nachweiskriterien von EN 1993-1-8 die sichere Bemessung einer Verbindung, die unter Verwendung des Verfahrens mit DTI vorgespannt wurde, nicht möglich. Die gezielte Formulierung von Anwendungsgrenzen oder zusätzlichen Nachweiskriterien für dieses Verfahren ist geboten. Vorhergehender Schritt dazu müsste die systematische Integration von Kategorien für den Zweck der auszuführenden Vorspannung (*Zielebenen*) sein, so dass eine gezielte Formulierung und Empfehlung zu verfahrensbezogenen Anwendungsgrenzen und Kontrollanforderungen vorgenommen werden kann.

Weitere Untersuchungen wären insbesondere für DTI mit großen Abmessungen wünschenswert, um die unterschiedlichen Vorspannkraftverluste zu bestimmen. Dies scheint geboten, da mittlerweile direkte Kraftanzeiger für die Abmessungen M36, M42 und M48 für den Einsatz in Flanschverbindungen von Windenergieanlagen verfügbar sind. Informationen bzw. Zertifikate zum zuverlässigen Einbringen der Vorspannkraft wurden bereits vorgelegt. Über den zuverlässigen Erhalt der Vorspannkraft liegen allerdings keine Erkenntnisse vor.



## 8 Literatur

- [AASHTO10] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO): *AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications. 3rd Edition, with 2010, 2011, 2012, 2014, 2015, and 2016 Interim Revisions*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 2010. ISBN 978-1-56051-452-7
- [AASHTO12] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO): *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Customary U.S. Units*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 2012. ISBN 978-1-56051-523-4
- [ADS11] HILTI Aktiengesellschaft: *Load-indicating washer*. Erfinder: J. APPL, A. D. DIJKHUIS, M. SCHÄFFER, M. GOLDT, A. ECKSTEIN. Anmeldung: 2011-08-24. Europäisches Patent EP2633201 B1, Europäisches Patentamt, München 2014-07-09.
- [AIJ12] Architectural Institute of Japan (AIJ): *Japanese Architectural Standard Specification JASS6 (2007). Structural Steelwork Specification for Building Construction*. Tokyo: Architectural Institute of Japan 2012. ISBN 978-4-81893-201-2
- [AO93] Fried. Krupp AG Hoesch-Krupp: *Zwischenlegscheibe für eine Schraubverbindung*. Erfinder: H. AHRENFELD, P. ORTH. Anmeldung: 1993-03-06. Patent DE4307059 C1, Deutsches Patentamt, München 1994-04-07.
- [AO94] Fried. Krupp AG Hoesch-Krupp: *Zwischenlegscheibe für eine Schraubverbindung mit Mitteln zum Anzeigen der Anzugskraft einer Schraube*. Erfinder: H. AHRENFELD, P. ORTH. Anmeldung: 1994-08-17. Patent DE4429082 C2, Deutsches Patentamt, München 1996-08-08.
- [BCSA10a] British Constructional Steelwork Association (BCSA): *National Structural Steelwork Specification for Building Construction. CE Marking Version. 5th Edition*, London: The British Constructional Steelwork Association 2010. ISBN 978-1-85073-062-0
- [BCSA10b] British Constructional Steelwork Association (BCSA): *Steel Bridges. A Practical Approach to Design for Efficient Fabrication and Construction*. 3rd Edition, London: The British Constructional Steelwork Association 2010. ISBN 978-1-85073-061-3

- [Be12] BERENBAK, J.: *Evaluation Tightening Preloaded Bolt Assemblies According to EN 1090-2. "Technical Requirements for Steel Structures" for 95% Reliability EN 1990*. Delft: Structural Design, Delft University of Technology 2012. [Zugriff am: 2015-12-07]. Verfügbar unter: [http://www.bouwenmetstaal.nl/uploads/vakblad/236\\_voorspanbouten\\_rapport.pdf](http://www.bouwenmetstaal.nl/uploads/vakblad/236_voorspanbouten_rapport.pdf)
- [Be60] BERRIDGE, P. S. A.: *The Use of High Strength Bolts in Railway Girder Bridges*, IABSE congress report 6 (1960), S. 313–332. DOI: 10.5169/seals-6966
- [Bi08] BICKFORD, J. H.: *Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints. Non-gasketed Joints*. Boca Raton, FL: CRC Press 2008. ISBN 978-0-84938-176-8
- [Bo79] BOUWMAN, L. P.: *Fatigue of Bolted Connections and Bolts Loaded in Tension*. Report 6-79-9. Delft: Stevin Laboratory – Steel Structures, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology 1979.
- [BP78] BOSTON, R. M.; PASK, J. W.: *Structural Fasteners and their application*. London: The British Constructional Steelwork Association 1978.
- [BSI08] British Standards Institution (BSI): *NA to BS EN 1993-1-8:2005. UK National Annex to Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-8: Design of joints*. London: British Standards Institution 2008. ISBN 978-0-580-54969-4. Verfügbar unter: <https://law.resource.org/pub/uk/ibr/bs.na.en.1993.1.8.2005.pdf>
- [Bü13] BÜCKER, C.: *Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von vorgespannten HV-Garnituren mit Direkten Kraftanzeigern (DTI) unter Zugbeanspruchung*. unveröffentlichte Master-Thesis, Essen: Institut für Metall- und Leichtbau, Universität Duisburg-Essen 2013.
- [BW64] BEER, H.; WALLNER, F.: *Beitrag zur Wandersicherheit von HV-Verbindungen*, IABSE congress report 7 (1964), S. 371–378. DOI: 10.5169/seals-7850
- [Ch64] CHESSEON, E., JR.: *Joint Behaviour of a Bolted Railway Bridge During Erection and Service*. Civil Engineering Studies SRS-284. Urbana, IL: Engineering Experiment Station, College of Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign 1964. Verfügbar unter: <http://hdl.handle.net/2142/14044>
- [Ch65] CHESSEON, E., JR.: *Bolted Bridge Behavior During Erection and Service*, Journal of the Structural Division 91 (1965), S. 57–70. ISSN 0044-8001
- [CM65] CHESSEON, E., JR.; MUNSE, W. H.: *Studies of the behavior of high-strength bolts and bolted joints*. Engineering Experiment Station Bulletin 469. Urbana, IL: Engineering Experiment Station, College of Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign 1965. Verfügbar unter: <http://hdl.handle.net/2142/4237>

- [Co05] COSGROVE, T. C.: *Structural fasteners*. In: Steel Details (Hrsg.: British Constructional Steelwork Association (BCSA)), S. 33–37. London: British Constructional Steelwork Association 2005. ISBN 0-85073-049-X
- [CRL12] CLEARY, D. B.; RIDDELL, W. T.; LACKE, C. J.: *Effect of Washer Placement on Performance of Direct Tension Indicators with Curved Protrusions*, Engineering Journal 49 (2012), S. 55–64. ISSN 0013-8029
- [DASt56] Deutscher Ausschluß für Stahlbau (DASt): *Vorläufige Richtlinien für Berechnung, Ausführung und bauliche Durchbildung von gleitfesten Schraubenverbindungen (HV-Verbindungen). Für stählerne Ingenieur- u. Hochbauten, Brücken u. Krane*. Köln: Stahlbau-Verlags-GmbH 1956.
- [DfT14] Great Britain Department for Transport, Highways Agency: *Manual of Contract Documents for Highway Works (MCHW) Volume 1. Specification for Highway Works*. Norwich: The Stationery Office 2014. ISBN 978-0-11552-705-0
- [DLF91] DAHL, J. S.; LU, L.-W.; FISHER, J. W.: *Comparative Effectiveness of Tightening Techniques for A490 1-1/4 Inch Diameter Bolts*. ATLSS Reports. Paper 168. Bethlehem, PA: ATLSS Engineering Research Center, Lehigh University 1991. Verfügbar unter: <http://preserve.lehigh.edu/engr-civil-environmental-atlss-reports/168>
- [DLF96] DAHL, J. S.; LU, L.-W.; FISHER, J. W.; ABRUZZO, J.: *Comparative Effectiveness of Tightening Techniques for A490 1¼-in. Diameter Bolts*, Engineering Journal 33 (1996), S. 7–17. ISSN 0013-8029
- [DLF97] DAHL, J. S.; LU, L.-W.; FISHER, J. W.; ABRUZZO, J.: *Closure: Comparative Effectiveness of Tightening Techniques for A490 1¼-in. Diameter Bolts*, Engineering Journal 34 (1997), S. 38–40. ISSN 0013-8029
- [DP94] DUBOIS, G.; PIRAPREZ, E.: *High Strength Friction Grip Bolts – Optimal Parameters for the Combined Method of Tightening*, Journal of Constructional Steel Research 28 (1994), S. 1–22. ISSN 0143-974X. DOI: 10.1016/0143-974X(94)90031-0
- [DSV07] Deutscher Schraubenverband e. V. (DSV): *Industrielle Schraubmontage. ICS-Handbuch*. 3. Auflage, Iserlohn: Mönning Verlag 2007. ISBN 978-3-933519-37-5
- [Du13] DUCHARDT, M.: *Bewertung des Vorspannkraftverlustes in Schraubenverbindungen unter kombinierter mechanischer und thermischer Beanspruchung*. Aachen: Shaker Verlag 2013. (zugleich Darmstadt, Technische Universität, Dissertation, 2013). ISBN 978-3-84402-210-0

- [ECCS85] European Convention for Constructional Steelwork (ECCS): *European Recommendations for Bolted Connections in Structural Steelwork*. ECCS Publication No. 38. Brüssel: European Convention for Constructional Steelwork 1985.
- [FB64] FISHER, J. W.; BEEDLE, L. S.: *High Strength Bolting in the U.S.A.*, IABSE congress report 7 (1964), S. 183–190. DOI: 10.5169/seals-7952
- [FKW79] FISHER, J. W.; KATO, B.; WOODWARD, H. M.; FRANK, K. H.: *Field Installation of High-Strength Bolts in North America and Japan*, IABSE surveys 3 (1979), S. 1–14. ISSN 0377-7251. DOI: 10.5169/seals-44928
- [Fr10] FRIEDE, R.: *Vorspannkraftverluste durch Setzen und selbsttätiges Losdrehen planmäßig vorgespannter Schraubenverbindungen*. In: Veröffentlichung des Instituts für Stahlbau und Werkstoffmechanik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 89, Darmstadt: Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, Technische Universität Darmstadt 2010. (zugleich Darmstadt, Technische Universität, Dissertation, 2010). ISBN 978-3-939195-20-7
- [GB84] GRUINIJES, T. J. J.; BOUWMAN, L. P.: *Slip factors of structural connections formed with high-strength friction grip bolts and with contact surfaces treated in various ways*. Report 6-84-10. Delft: Stevin Laboratory – Steel Structures, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology 1984.
- [Gl13] GLIENKE, R.: *Beitrag zur Bemessung von Verbindungen mit Schließringbolzen im Stahl- und Maschinenbau*. Dissertation. Rostock: Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Universität Rostock 2013.
- [Go65] GODFREY, G. B.: *High Strength Friction Grip Bolts*. London: The British Constructional Steelwork Association 1965.
- [Ha01] HADRYCH, I.: *Wachstum von Ermüdungsrissen an Niet- und Schraubenlöchern unter Berücksichtigung von Vorspannkraften der Verbindungsmittel*. Düsseldorf: VDI Verlag 2001. (zugleich Hamburg-Harburg, Technische Universität, Dissertation, 2001). ISBN 978-3-18316-704-3
- [Ha11] HANSEN, C.: *Untersuchungen zur Anwendung von kraftanzeigenden DTI-Scheiben nach DIN EN 1090-2*. unveröffentlichte Master-Thesis, Essen: Institut für Metall- und Leichtbau, Universität Duisburg-Essen 2011.
- [Ha94] fischerwerke Artur Fischer GmbH & Co KG: *Vorspannkontrollelement für Schraubanker*. Erfinder: M. HAAGE. Anmeldung: 1994-06-23. Patentanmeldung DE4421959 A1, Deutsches Patentamt, München 1996-01-04.
- [HL93] J & M Turner, Inc.: *Direct tension indicator washer*. Erfinder: A. C. HOOD, L. J. LARSON. Anmeldung: 1993-06-24. United States Patent US5370483 A, United States Patent and Trademark Office, Alexandria (VA) 1994-12-06.



- [HV02] HASSELMANN, U.; VALTINAT, G.: *Geschraubte Verbindungen*. In: Stahlbau-Kalender 2002 (Hrsg.: U. Kuhlmann), S. 343–421. Berlin: Ernst & Sohn Verlag 2002. ISBN 3-433-01594-5. DOI: 10.1002/stab.200201710
- [HW00] Applied Bolting Technology Products Inc.: *Direct multi-tension indicating washer having bumps of a first and second height*. Erfinder: J. A. HERR, I. W. WALLACE. Anmeldung: 2000-07-11. United States Patent US6425718 B1, United States Patent and Trademark Office, Alexandria (VA) 2002-07-30.
- [IE01] ILLGNER, K.-H.; ESSER, J.: *Schrauben Vademecum*. 9. Auflage, Bramsche: Rasch Verlag 2001. ISBN 3-935326-46-7
- [Ja03] JAKUBOWSKI, A.: *Ermüdungssichere Bemessung geschraubter Ringflanschstöße in turmartigen Stahlbauten unter besonderer Berücksichtigung von Flanschimperfektionen*. Göttingen: Cuvillier Verlag 2003. (zugleich Essen, Universität, Dissertation, 2003). ISBN 978-3-89873-672-5
- [JMT81] J & M Turner Inc.: *DTI Case Study. Gerald Gentleman Power Station*. [Zugriff am: 2015-12-07]. Verfügbar unter: <http://www.turnasure.com/pdf/reports/DTIs%20Save%20Money.pdf>
- [JSCE09] Japan Society of Civil Engineers (JSCE): *Standard Specifications for Steel and Composite Structures. I General Provision, II Structural Planning, III Design*. 1st Edition, Tokyo: Japan Society of Civil Engineers 2009. ISBN 978-4-8106-0565-5
- [KFS01] KULAK, G. L.; FISHER, J. W.; STRUIK, J. H. A.: *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*. 2nd Edition, Chicago, IL: American Institute of Steel Construction 2001. ISBN 1-56424-075-4. Verfügbar unter: <http://www.boltcouncil.org/files/2ndEditionGuide.pdf>
- [KLS86] KLOOS, K.-H.; LANDGREBE, R.; SCHNEIDER, W.: *Untersuchungen zur Anwendbarkeit hochtemperaturverzinkter HV-Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9*, VDI Zeitschrift 128 (1986), S. 98–100, 103–108. ISSN 0372-543X
- [Ko64] KONISHI, I.: *Studies on the Application of High-Strength Bolted Joints to Bridges*, IABSE congress report 7 (1964), S. 363–370. DOI: 10.5169/seals-7849
- [KPS96] KATZUNG, W.; PFEIFFER, H.; SCHNEIDER, A.: *Zum Vorspannkraftabfall in planmäßig vorgespannten Schraubenverbindungen mit beschichteten Kontaktflächen*, Stahlbau 65 (1996), S. 307–311. ISSN 0038-9145
- [KTW07] KLOOS, K.-H.; THOMALA, W.; WIEGAND, H.: *Schraubenverbindungen. Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung*. 5. Auflage, Berlin: Springer Verlag 2007. ISBN 978-3-540-21282-9. DOI: 10.1007/978-3-540-68470-1

- [Ku05] KULAK, G. L.: *High Strength Bolting for Canadian Engineers*. 1st Edition, Willowdale, ON: Canadian Institute of Steel Construction 2005. ISBN 0-88811-109-6. Verfügbar unter: <http://www.cisc-icca.ca/files/publications/techpubs/design/bolting/HighStrengthBolting.pdf>
- [KU96] KULAK, G. L.; UNDERSHUTE, S. T.: *Strength and installation characteristics of tension control bolts*. In: *Connections in Steel Structures III. Behaviour, strength, and design* (Hrsg.: R. Bjorhovde et al.), S. 515–525. Kidlington, Oxford: Elsevier Science Ltd 1996. ISBN 978-0-08-042821-5. DOI: 10.1016/B978-008042821-5/50107-3
- [KYM02] KITADA, T.; YAMAGUCHI, T.; MATSUMURA, M.; OKADA, J.; ONO, K.; OCHI, N.: *New technologies of steel bridges in Japan*, Journal of Constructional Steel Research 58 (2002), S. 21–70. ISSN 0143-974X. DOI: 10.1016/S0143-974X(01)00029-3
- [La84] LACHER, G.: *Zur Weiterentwicklung der Anziehtechnik von hochfesten vorgespannten Schrauben im Stahlbau*. In: *Festschrift Roik* (Hrsg.: F. Nather et al.), S. 511–527. Bochum: Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum 1984.
- [Le00] LEHMANN, D.: *Berechnung von L-Flanschen mit unterschiedlichen Kontaktflächen/Ringflanschformen nach DIN 4133*, Stahlbau 69 (2000), S. 682–687. ISSN 0038-9145. DOI: 10.1002/stab.200002520
- [LH05] LORI, W.; HOHMANN, F.: *Reibungs- und torsionsfreies hydraulisches Anziehen – Vorspannkraftverluste und deren Beeinflussung*. In: *Schraubenverbindungen – Berechnung, Gestaltung, Anwendung* (Hrsg.: VDI-Gesellschaft Entwicklung, Konstruktion, Vertrieb), S. 211–223. Düsseldorf: VDI-Verlag 2005. ISBN 3-18-091903-5
- [LS11] LENER, G.; SCHWEIGKOFER, H.: *Einfluss imperfekter Ringflanschverbindungen auf die Ermüdungsfestigkeit von kreiszylindrischen Stützen*, Stahlbau 80 (2011), S. 347–355. ISSN 0038-9145. DOI: 10.1002/stab.201101423
- [MNC79] Klöckner-Humboldt-Deutz AG: *Anordnung zur Messung und Überprüfung der Spannkraft einer Schraubenverbindung*. Erfinder: H. METTIG, W. NAU, J.-E. CARSTENSEN. Anmeldung: 1979-09-27. Patentanmeldung DE2939096 A1, Deutsches Patentamt, München 1981-04-16.
- [Mo13] MOOSMANN, Y.: *Untersuchung zur Anwendung von kraftanzeigenden DTI-Scheiben mit HV-Garnituren nach DIN EN 1090-2*. unveröffentlichte Master-Thesis, Essen: Institut für Metall- und Leichtbau, Universität Duisburg-Essen 2013.
- [OC89] OWENS, G. W.; CHEAL, B. D.: *Structural Steelwork Connections*. London: Butterworths 1989. ISBN 0-408-01214-5

- [Oe14] OEHMS, U.: *Schraubgerechte Konstruktion von Schraubenverbindungen größer M24 unter der Vorgabe einer prozesssicheren Montage*. In: 6. VDI/VDE-Fachtagung Schraubmontage 2014. Von der Entwicklung zur prozesssicheren Produktion (Hrsg.: VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik), S. 69–75. Düsseldorf: VDI-Verlag 2014. ISBN 978-3-18-092219-5
- [PAED98] U.S. District Court for the Eastern District of Pennsylvania: J & M TURNER, INC., Plaintiff v. APPLIED BOLTING TECHNOLOGY PRODUCTS, INC., et. al., Civil Action No. 95-2179, 1998. Verfügbar unter: <http://www.paed.uscourts.gov/documents/opinions/98D0126P.pdf>
- [Pe13] PETERSEN, C.: *Stahlbau. Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten*. 4. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag 2013. ISBN 978-3-8348-8610-1. DOI: 10.1007/978-3-8348-8610-1
- [Pe98] PETERSEN, C.: *Nachweis der Betriebsfestigkeit exzentrisch beanspruchter Ringflanschverbindungen*, Stahlbau 67 (1998), S. 191–203. ISSN 0038-9145. DOI: 10.1002/stab.199800690
- [PHV15] PAVLOVIĆ, M.; HEISTERMANN, C.; VELJKOVIĆ, M.; PAK, D.; FELDMANN, M.; REBELO, C.; SILVA, L. S. DA: *Connections in towers for wind converters, Part II: The friction connection behaviour*, Journal of Constructional Steel Research 115 (2015), S. 458–466. ISSN 0143-974X. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.05.009
- [RBY14] REUTHER, D.; BAKER, I.; YETKA, A.; CLEARY, D. B.; RIDDELL, W.: *Relaxation of ASTM A325 Bolted Assemblies*, Journal of Structural Engineering 140 (2014), S. 04014060. ISSN 0733-9445. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000937
- [RCSC14] Research Council on Structural Connections (RCSC): *Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts*. Chicago, IL, 2014. Verfügbar unter: <http://www.boltcouncil.org/files/2014RCSCSpecification-2014.pdf>
- [RCSC51] Research Council on Structural Connections (RCSC): *Specification for Assembly of Structural Joints Using High Tensile Steel Bolts*, Chicago, IL, 1951.
- [RCSC85] Research Council on Structural Connections (RCSC): *Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts*, Chicago, IL, 1985.
- [Ri99] RICKER, D.: *Discussion: The Effects of Over-Compressing ASTM F959 Direct Tension Indicators on A325 Bolts Used in Shear Connections*, Engineering Journal 36 (1999), S. 142. ISSN 0013-8029
- [Ru12] RUTKOWSKI, T.: *Zum Vorspannen von Stahlbauverschraubungen großer Abmessungen*. In: Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (Hrsg. P. Schaumann), Heft 28, Aachen: Shaker Verlag 2012. (zugleich Hannover, Leibniz Universität, Dissertation, 2011). ISBN 978-3-8440-0759-6

- [Ru92] RUDOLF, H.: *Schraubtechnik. Grundlagen Schraubsysteme Anziehverfahren*. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie 1992. ISBN 3-478-93073-1
- [SBA14] SCHIBORR, M.; BERG, J.; AFZALI, N.; STRANGHÖNER, N.: *Bestimmung der Haftreibungszahl gleitfester Verbindungen – Auswirkungen unterschiedlicher Handhabungen der Regelwerke*. In: 19. DAST-Forschungskolloquium in Hannover (Hrsg.: Deutscher Ausschuß für Stahlbau (DAST)), S. 120–125. Düsseldorf: Deutscher Ausschuß für Stahlbau 2014. ISBN 978-3-929371-33-8
- [Sc03] SCHWEIZER, H. H.: *Elektrowerkzeuge und ihre Anwendung. 1500 Fragen und Antworten*. ROBERT BOSCH GmbH. Konstanz: Christiani 2003. ISBN 978-3-87125-502-1
- [Sc13] SCHIBORR, M.: *Untersuchungen zur Anwendung von Direkten Kraftanzeigern (DTI)*. unveröffentlichter Vortrag auf Sitzung des NA 067-00-07 AA „Verbindungselemente für den Metallbau“. Hagen: Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) 2013-09-24.
- [Sc76] SCHRÖTER, H.-J.: *Neuartige Unterlegscheiben zeigen Vorspannkraft an*, Stahlbau 45 (1976), S. 26. ISSN 0038-9145
- [Sc91] SCHMIDT, H.: *Geschraubte Verbindungen unter vorwiegend ruhender Beanspruchung*. In: Wissenschaft und Praxis. 13. Stahlbauseminar 1991 (Hrsg.: R. Avak), S. 237–272. Biberach: Bauakademie 1991.
- [Sc99] SCHMECKPEPER, E. R.: *Closure: The Effects of Over-Compressing ASTM F959 Direct Tension Indicators on A325 Bolts Used in Shear Connections*, Engineering Journal 36 (1999), S. 143. ISSN 0013-8029
- [SCI03] WAY, A. G. J.; SALTER, P.: *Introduction to Steelwork Design to BS 5950-1:2000*. SCI Publication P325. Ascot: The Steel Construction Institute 2003. ISBN 1-85942-141-5
- [SCI04] COSGROVE, T. C.: *Tension Control Bolts, Grade S10T, in Friction Grip Connections*. SCI Publication P324. Ascot: The Steel Construction Institute 2004. ISBN 1-85942-156-3
- [SCI09] BRETTL, M. E.; BROWN, D. G.: *Steel Building Design. Concise Eurocodes, in accordance with Eurocodes and the UK National Annexes*. SCI Publication P362. Ascot: The Steel Construction Institute 2009. ISBN 978-1-85942-194-9
- [SCI12] HENDY, C. R.; ILES, D. C.: *Steel Bridge Group. Model Project Specification. For the Execution of Steelwork in Bridge Structures*. SCI Publication P382. Revised Edition, Ascot: The Steel Construction Institute 2012. ISBN 978-1-85942-190-1

- [SCI15] HENDY, C. R.; ILES, D. C.: *Steel Bridge Group. Guidance Notes on Best Practice in Steel Bridge Construction*. SCI Publication P185. 6th Edition, Ascot: The Steel Construction Institute 2015. ISBN 978-1-85942-217-5
- [Se01] SEIDEL, M.: *Zur Bemessung geschraubter Ringflanschverbindungen von Windenergieanlagen*. In: Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (Hrsg. P. Schaumann), Heft 20, Aachen: Shaker Verlag 2001. (zugleich Hannover, Leibniz Universität, Dissertation, 2011). ISBN 978-3-8265-8911-9
- [SF96] SHARP, D. F.; FLUCKER, R. L.: *Critique: Comparative Effectiveness of Tightening Techniques for A490 1¼-in. Diameter Bolts*, Engineering Journal 33 (1996), S. 77–80. ISSN 0013-8029
- [Sh96] TURNER, F. JONATHAN M.: *Direct tension indicator washer*. Erfinder: D. L. SHARP. Anmeldung: 1996-02-06. United States Patent US5667346 A, United States Patent and Trademark Office, Alexandria (VA) 1997-09-16.
- [Sh98] SHARP, D. L.: *Control with Direct Tension Indicators*. In: Handbook of Bolts and Bolted Joints (Hrsg.: J. Bickford et al.), S. 621–630. New York: Marcel Dekker 1998. ISBN 0-8247-9977-1
- [SHM15] SCHMIDT, H.; HÜLLER, V.; MACHURA, G.: *Fertigung und Errichtung von Stahltragwerken – praktische Umsetzung der neuen Regelungen nach DIN EN 1090*. In: Stahlbau-Kalender 2015 (Hrsg.: U. Kuhlmann), S. 287–366. Berlin: Ernst & Sohn Verlag 2015. ISBN 978-3-433-03104-9. DOI: 10.1002/9783433605219
- [SI82] SURTEES, J. O.; IBRAHIM, M. E.: *Load Indicating Washers. Reprint from Civil Engineering April 1982*. [Zugriff am: 2015-12-07]. Verfügbar unter: <http://www.turnasure.com/pdf/reports/LIW%20Bolt%20Relaxation%20.pdf>
- [SMV54] STEINHARDT, O.; MÖHLER, K.; VALTINAT, G.: *Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau*. Köln: Stahlbau-Verlags-GmbH 1954.
- [SMV59] STEINHARDT, O.; MÖHLER, K.; VALTINAT, G.: *Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau. II. Teil*. Köln: Stahlbau-Verlags-GmbH 1959.
- [SMV62] STEINHARDT, O.; MÖHLER, K.; VALTINAT, G.: *Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau. III. Teil*. Köln: Stahlbau-Verlags-GmbH 1962.
- [SMV69] STEINHARDT, O.; MÖHLER, K.; VALTINAT, G.: *Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau. IV. Teil*. Köln: Stahlbau-Verlags-GmbH 1969.

- [SN97] SCHMIDT, H.; NEUPER, M.: *Zum elastostatischen Tragverhalten exzentrisch gezogener L-Stöße mit vorgespannten Schrauben*, Stahlbau 66 (1997), S. 163–168. ISSN 0038-9145
- [SNG94] SCHMECKPEPER, E. R.; NIELSEN, R. J.; GENTRY, G.: *Effects of Bolt Over-Tightening on Bolted Connections*. In: Structures Congress XII (Hrsg.: N. Baker et al.), S. 713–718. New York: American Society of Civil Engineers 1994. ISBN 0-87262-952-X
- [SNG99] SCHMECKPEPER, E. R.; NIELSEN, R. J.; GENTRY, G.: *The Effects of Over-Compressing ASTM F959 Direct Tension Indicators on A325 Bolts Used in Shear Connections*, Engineering Journal 36 (1999), S. 39–50. ISSN 0013-8029
- [SOF73] STRUIK, J. H. A.; OYELEDUN, A. O.; FISHER, J. W.: *Bolt Tension Control with a Direct Tension Indicator*, Engineering Journal 10 (1973), S. 1–5. ISSN 0013-8029
- [SS11] SCHMIDT, H.; STRANGHÖNER, N.: *Ausführung geschraubter Verbindungen nach DIN EN 1090-2*. In: Stahlbau-Kalender 2011 (Hrsg.: U. Kuhlmann), S. 283–340. Berlin: Ernst & Sohn Verlag 2011. ISBN 978-3-433-02955-8. DOI: 10.1002/9783433600863
- [SS12a] SCHIBORR, M.; STRANGHÖNER, N.: *Experimental investigations into the application of direct tension indicators with preloaded structural bolting assemblies (HV system) to EN 1090-2*, Steel Construction – Design and Research 5 (2012), S. 168–174. ISSN 1867-0520. DOI: 10.1002/stco.201210021
- [SS12b] SCHIBORR, M.; STRANGHÖNER, N.: *Experimental investigations into the application of direct tension indicators with preloaded structural bolting assemblies (HV system) to EN 1090-2*. In: Proceedings of the Nordic Steel Construction Conference 2012 (Hrsg.: Norsk Stålförbund), S. 635–644. Oslo: Norwegian Steel Association 2012. ISBN 978-82-91466-12-5
- [SS14] SCHIBORR, M.; STRANGHÖNER, N.: *Einsatz von direkten Kraftanzeigern (DTI) zum Vorspannen von Schraubenverbindungen*. In: Festschrift Peter Schaumann (Hrsg.: P. Schaumann et al.), S. 107–114. Hannover: Institut für Stahlbau, Leibniz Universität Hannover 2014. [Online-Ressource] DOI: 10.2314/GBV:77999762X
- [SSG13] STRANGHÖNER, N.; SCHIBORR, M.; GLIENKE, R.; WANNER, M.-C.; ULBRICH, D.: *Gleitfeste Verbindungen nach Eurocode 3 und DIN EN 1090-2*, Stahlbau 82 (2013), S. 750–761. ISSN 0038-9145. DOI: 10.1002/stab.201310098

- [SSG14] STRANGHÖNER, N.; SCHIBORR, M.; GLIENKE, R.: *Procedure Test of Slip-Resistant Connections According to EN 1090-2*. In: Proceedings of the EUROSTEEL 2014, 7th European Conference on Steel and Composite Structures (Hrsg.: R. Landolfo et al.), S. 1041–1042. Brüssel: European Convention for Constructional Steelwork 2014. ISBN 978-92-9147121-8
- [St01] STARK, J. W. B.: *Performance Requirements for Preloaded Bolts in Structural Connections*. In: Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Günther Valtinat (Hrsg.: J. Priebe et al.), S. 371–380. Hamburg-Harburg: Arbeitsbereich Stahlbau und Holzbau, Technische Universität Hamburg-Harburg 2001. ISBN 3-00-008440-1
- [St96] STEURER, A.: *Trag- und Verformungsverhalten von auf Zug beanspruchten Schrauben*. Basel: Birkhäuser Verlag 1996. ISBN 3-7643-5464-X. DOI: 10.3929/ethz-a-001677983
- [St99] STEURER, A.: *Das Tragverhalten und Rotationsvermögen geschraubter Stirnplattenverbindungen*. Basel: Birkhäuser Verlag 1999. (zugleich Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Dissertation, 1999 u. d. T.: Steurer, Anton: Das Rotationsvermögen geschraubter Stirnplattenverbindungen). ISBN 3-7643-6272-3. DOI: 10.3929/ethz-a-003878456
- [SZB05] SCHMIDT, H.; ZWÄTZ, R.; BÄR, L.; SCHULTE, U.: *Ausführung von Stahlbauten. Erläuterungen zu DIN 18800-7 mit CD-ROM*. 1. Auflage, Berlin: Beuth und Ernst & Sohn Verlag 2005. ISBN 3-433-01704-2
- [SZB12] SCHMIDT, H.; ZWÄTZ, R.; BÄR, L.; KATHAGE, K.; HÜLLER, V.; KAMMEL, C.; VOLZ, M.: *Ausführung von Stahlbauten. Kommentare zu DIN EN 1090-1 und DIN EN 1090-2*. 1. Auflage, Berlin: Beuth und Ernst & Sohn Verlag 2012. ISBN 978-3-433-02941-1. DOI: 10.1002/9783433604700
- [TH90] J & M Turner Inc.: *Direct Tension Indicator Washer*. Erfinder: F. J. M. TURNER, A. C. HOOD. Anmeldung: 1990-05-15. United States Patent US5015132 A, United States Patent and Trademark Office, Alexandria (VA) 1991-05-14.
- [TMB05] TAN, W.; MALEEV, V. V.; BIRKEMOE, P. C.: *Installation Characteristics of ASTM F1852 Twist-off Type Tension Control Structural Bolt/Nut/Washer Assemblies*. Toronto, ON: Department of Civil Engineering, University of Toronto 2005. [Zugriff am: 2015-12-07]. Verfügbar unter: <http://www.boltcouncil.org/files/FinalReportonTCBoltsPhase1.pdf>
- [TN64] TADA, H.; NAKA, T.: *Experiment on Tensile Joints using High-Strength Bolts*, IABSE congress report 7 (1964), S. 387–396. DOI: 10.5169/seals-7852

- [TSS06] TurnAnut LLC: *Load indicating fastener and method of manufacture*. Erfinder: F. J. M. TURNER, N. STRUMBOS, R. STEWART. Anmeldung: 2006-08-10. United States Patent US7635243 B2, United States Patent and Trademark Office, Alexandria (VA) 2009-12-22.
- [TT64] TOMONAGA, K.; TAJIMA, J.: *The Use of High-Strength Bolted Joints in Railway Bridges*, IABSE congress report 7 (1964), S. 379–385. DOI: 10.5169/seals-7851
- [Tu11] TurnaSure LLC: *Instruction Manual for installing Preloaded (HSFG) Bolting with TurnaSure® DIRECT TENSION INDICATORS CE Marked EN 14399-9*. [Zugriff am: 2015-12-07]. Verfügbar unter: [http://www.turnasure.com/pdf/Install\\_CEN14399-9.pdf](http://www.turnasure.com/pdf/Install_CEN14399-9.pdf)
- [Tu15a] TurnaSure LLC: *Why Use TurnaSure Direct Tension Indicators (DTIs)?*. [Zugriff am: 2015-12-07]. Verfügbar unter: <http://www.turnasure.com/benefits-of-using-direct-tension-indicator-dti.shtml>
- [Tu15b] TurnaSure LLC: *Direct Tension Indicators. Improved designs for structural applications*. [Zugriff am: 2015-12-07]. Verfügbar unter: <http://www.turnasure.com/pdf/Turnasure-ASTM%20F959-F959M-Structural-Brochure.pdf>
- [Tu62] Cooper & Turner Ltd: *Fastener Assembly and Pre-Load Indicating Washer Therefor*. Erfinder: R. F. TURNER. Anmeldung: 1962-12-14. United States Patent US3187621 A, United States Patent and Trademark Office, Alexandria (VA) 1965-06-08.
- [UPU15] UNGERMANN, D.; PUTHLI, R. S.; UMMENHOFER, T.; WEYNAND, K.: *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Band 2: Anschlüsse*. 1. Auflage, Berlin: Beuth und Ernst & Sohn Verlag 2015. ISBN 978-3-410-24123-2. DOI: 10.1002/9783433603765
- [US15] UNGERMANN, D.; SCHNEIDER, S.: *Stahlbaunormen*. In: *Stahlbau-Kalender 2015* (Hrsg.: U. Kuhlmann), S. 1–124. Berlin: Ernst & Sohn Verlag 2015. ISBN 978-3-433-03104-9. DOI: 10.1002/9783433605219
- [VAD93] VALTINAT, G.; ALBRECHT, F.; DANGELMAIER, P.: *Gleitfeste Verbindungen mit feuerverzinkten Stahlteilen und reibfesten Beschichtungen oder anderen reibbeiwerterhöhenden Maßnahmen. (Teil I und Teil II)*. Bericht 122 des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e. V. In: *Schriftenreihe Stahlbau und Holzbau*, Technische Universität Hamburg-Harburg (Hrsg. G. Valtinat), Heft 3. Hamburg: Technische Universität Hamburg-Harburg 1993. Kurzfassung verfügbar unter: [http://www.gav-verzinken.de/fileadmin/user\\_upload/gav\\_122.zip](http://www.gav-verzinken.de/fileadmin/user_upload/gav_122.zip)



- [VFN10] VELJKOVIC, M.; FELDMANN, M.; NAUMES, J.; PAK, D.; REBELO, C.; SILVA, L. S. DA: *Friction Connection in Tubular Towers for a Wind Turbine*, Stahlbau 79 (2010), S. 660–668. ISSN 0038-9145. DOI: 10.1002/stab.201001365
- [VH03] VALTINAT, G.; HUHN, H.: *Festigkeitssteigerung von Schraubenverbindungen bei ermüdungsbeanspruchten, feuerverzinkten Stahlkonstruktionen*, Stahlbau 72 (2003), S. 715–724. ISSN 0038-9145. DOI: 10.1002/stab.200302480
- [VH95] VALTINAT, G.; HADRYCH, I.: *Messung der Vorspannkkräfte von Nieten in Altbrücken. Entwicklung der Messtechnik*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 1995.
- [VPG98] VALTINAT, G.; PIRAPREZ, E.; GRAFF, E.: *International Tightening Tests with High Strength Bolts M20x100 of the Systems HR and HV*. In: Schriftenreihe Stahlbau und Holzbau, Technische Universität Hamburg-Harburg (Hrsg. G. Valtinat), Heft 4. Hamburg: Technische Universität Hamburg-Harburg 1998.
- [Wa10] Applied Bolting Technology Products, Inc.: *Direct tension multi-color indicating washers*. Erfinder: I. W. WALLACE. Anmeldung: 2010-05-14. United States Patent US8382409 B2, United States Patent and Trademark Office, Alexandria (VA) 2013-02-26.
- [WH97] Applied Bolting Technology Products, Inc.: *Direct tension indicating washers*. Erfinder: I. W. WALLACE, J. A. HERR. Anmeldung: 1997-02-21. United States Patent US5769581 A, United States Patent and Trademark Office, Alexandria (VA) 1998-06-23.
- [WL60] WRIGHT, D. T.; LEWIS, E. M.: *Fundamental Concepts, and the Development of Specifications for High-Tensile Bolted Joints*, IABSE congress report 6 (1960), S. 371–382. DOI: 10.5169/seals-6969
- [WR03] WILLIAMS, P.; REED, R.: *Bolting*. In: Steel Buildings (Hrsg.: British Constructional Steelwork Association (BCSA)), S. 91–98. London: British Constructional Steelwork Association 2003. ISBN 0-85073-043-0
- [Ya83] YAMADA, M.: *Zur Anwendung von Hochfesten Dreh-Scher-(Torshear-) Schraubenverbindungen in Japan*, Stahlbau 52 (1983), S. 376–377. ISSN 0038-9145
- [YFP87] YURA, J. A.; FRANK, K. H.; POLYZOIS, D.: *High Strength Bolts for Bridges*. Publication No. FHWA/RD-87/088. McLean, VA: Turner-Fairbank Highway Research Center, Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation 1987.
- [YNW12] YANG, X.; NASSAR, S. A.; WU, Z.; MENG, A.: *Nonlinear Behavior of Preloaded Bolted Joints Under a Cyclic Separating Load*, Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME 134 (2012), S. 011206. ISSN 0094-9930. DOI: 10.1115/1.4004614

- [Zh05] ZHANG, O.: *Discussions on Behavior of Bolted Joints in Tension*, Journal of Mechanical Design 127 (2005), S. 506–510. ISSN 1050-0472.  
DOI: 10.1115/1.1867513
- [ZP04] ZHANG, O.; POIRIER, J. A.: *New Analytical Model of Bolted Joints*, Journal of Mechanical Design 126 (2004), S. 721–728. ISSN 1050-0472.  
DOI: 10.1115/1.1760777

## 9 Normen, Richtlinien und Zulassungen

ASME B18.2.6-2010,

*Fasteners for Use in Structural Applications*

ASME B18.2.6M-2012,

*Metric Fasteners for Use in Structural Applications*

ASTM A325-14,

*Standard Specification for Structural Bolts, Steel, Heat Treated, 120/105 ksi Minimum Tensile Strength*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, DOI: 10.1520/A0325-14, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM A325M-14,

*Standard Specification for Structural Bolts, Steel, Heat Treated 830 MPa Minimum Tensile Strength (Metric)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, DOI: 10.1520/A0325M-14, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM A490-14a,

*Standard Specification for Structural Bolts, Alloy Steel, Heat Treated, 150 ksi Minimum Tensile Strength*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, DOI: 10.1520/A0490-14A, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM A490M-14a,

*Standard Specification for High-Strength Steel Bolts, Classes 10.9 and 10.9.3, for Structural Steel Joints (Metric)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, DOI: 10.1520/A0490M-14A, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM F606-11a,

*Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally and Internally Threaded Fasteners, Washers, Direct Tension Indicators, and Rivets*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, DOI: 10.1520/F0606-11A, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM F606M-13,

*Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally and Internally Threaded Fasteners, Washers, and Rivets (Metric)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, DOI: 10.1520/F0606M-13, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM F959-13,

*Standard Specification for Compressible-Washer-Type Direct Tension Indicators for Use with Structural Fasteners*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, DOI: 10.1520/F0959-13, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM F959M-13,

*Standard Specification for Compressible-Washer-Type Direct Tension Indicators for Use With Structural Fasteners (Metric)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, DOI: 10.1520/F0959M-13, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM F1470-09,

*Standard Practice for Fastener Sampling for Specified Mechanical Properties and Performance Inspection*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, DOI: 10.1520/F1470-09, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM F1852-08,

*Standard Specification for "Twist Off" Type Tension Control Structural Bolt/Nut/Washer Assemblies, Steel, Heat Treated, 120/105 ksi Minimum Tensile Strength*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008, DOI: 10.1520/F1852-08, [www.astm.org](http://www.astm.org)

ASTM F2280-08e1,

*Standard Specification for "Twist Off" Type Tension Control Structural Bolt/Nut/Washer Assemblies, Steel, Heat Treated, 150 ksi Minimum Tensile Strength*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008, DOI: 10.1520/F2280-08E01, [www.astm.org](http://www.astm.org)

BS 4604-1:1970,

*Specification for the use of high strength friction grip bolts in structural steelwork. Metric series. Part 1: General grade*

BS 4604-2:1970,

*Specification for the use of high strength friction grip bolts in structural steelwork. Metric series. Part 2: Higher grade (parallel shank)*

- BS 5950-1:2000,  
*Structural use of steelwork in building. Code of practice for design. Rolled and welded sections*
- BS 7644-1:1993,  
*Direct tension indicators. Specification for compressible washers*
- BS 7644-2:1993,  
*Direct tension indicators. Specification for nut face and bolt face washers*
- NA to BS EN 1993-1-8:2005, 2008-11-30,  
*UK National Annex to Eurocode 3. Design of steel structures. Design of joints*
- DAST-Richtlinie 021:2013-09,  
*Schraubenverbindungen aus feuerverzinkten Garnituren M 39 bis M 72 entsprechend DIN EN 14399-4, DIN EN 14399-6*
- DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen, Fassung Oktober 2012,  
*Richtlinie für Windenergieanlagen, Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung, Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik, Reihe B, Heft 8, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 2012*
- DIN 969:1997-12,  
*Verbindungselemente mit Gewinde – Schwingfestigkeitsversuch bei Axialbelastung – Prüfverfahren und Auswertung der Ergebnisse*
- DIN 18800-1:2008-11,  
*Stahlbauten – Teil 1: Bemessung und Konstruktion*
- DIN 18800-7:2008-11,  
*Stahlbauten – Teil 7: Ausführung und Herstellerqualifikation*
- DIN 25201-1:2004-06,  
*Konstruktionsrichtlinie für Schienenfahrzeuge und deren Komponenten Schraubenverbindungen Teil 1: Einteilung, Kategorien der Schraubenverbindungen*
- DIN EN 1090-2:2011-10,  
*Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Deutsche Fassung EN 1090-2:2008+A1:2011*

DIN EN 1993-1-8:2010-12,

*Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8:  
Bemessung von Anschlüssen*; Deutsche Fassung EN 1993-1-8:2005 + AC:2009

DIN EN 1993-1-8/NA:2010-12,

*Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung  
und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen*

DIN EN 14399-1:2015-04,

*Hochfeste vorspannbare Garnituren für Schraubverbindungen im Metallbau –  
Teil 1: Allgemeine Anforderungen*; Deutsche Fassung EN 14399-1:2015

DIN EN 14399-2:2015-04,

*Hochfeste vorspannbare Garnituren für Schraubverbindungen im Metallbau –  
Teil 2: Eignung zum Vorspannen*; Deutsche Fassung EN 14399-2:2015

DIN EN 14399-3:2015-04,

*Hochfeste vorspannbare Garnituren für Schraubverbindungen im Metallbau –  
Teil 3: System HR – Garnituren aus Sechskantschrauben und -muttern;  
Deutsche Fassung EN 14399-3:2015*

DIN EN 14399-4:2015-04,

*Hochfeste vorspannbare Garnituren für Schraubverbindungen im Metallbau –  
Teil 4: System HV – Garnituren aus Sechskantschrauben und -muttern;  
Deutsche Fassung EN 14399-4:2015*

DIN EN 14399-5:2015-04,

*Hochfeste vorspannbare Garnituren für Schraubverbindungen im Metallbau –  
Teil 5: Flache Scheiben*; Deutsche Fassung EN 14399-5:2015

DIN EN 14399-6:2015-04,

*Hochfeste vorspannbare Garnituren für Schraubverbindungen im Metallbau –  
Teil 6: Flache Scheiben mit Fase*; Deutsche Fassung EN 14399-6:2015

DIN EN 14399-7:2008-03,

*Hochfeste planmäßig vorspannbare Schraubenverbindungen für den Metallbau –  
Teil 7: System HR – Garnituren aus Senkschrauben und Muttern*; Deutsche  
Fassung EN 14399-7:2007

DIN EN 14399-8:2008-03,

*Hochfeste planmäßig vorspannbare Schraubenverbindungen für den Metallbau – Teil 8: System HV – Garnituren aus Sechskant-Passschrauben und Muttern; Deutsche Fassung EN 14399-8:2007*

DIN EN 14399-9:2009-07,

*Hochfeste planmäßig vorspannbare Schraubenverbindungen für den Metallbau – Teil 9: System HR oder HV – Direkte Kraftanzeiger für Garnituren aus Schrauben und Muttern; Deutsche Fassung EN 14399-9:2009*

DIN EN 14399-10:2009-07,

*Hochfeste planmäßig vorspannbare Schraubenverbindungen für den Metallbau – Teil 10: System HRC – Garnituren aus Schrauben und Muttern mit kalibrierter Vorspannung; Deutsche Fassung EN 14399-10:2009*

DIN EN 15048-1:2007-07,

*Garnituren für nicht planmäßig vorgespannte Schraubenverbindungen für den Metallbau – Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 15048-1:2007*

DIN EN 20273:1992-02,

*Durchgangslöcher für Schrauben (ISO 273:1979); Deutsche Fassung EN 20273:1991*

DIN EN ISO 225:2011-02,

*Mechanische Verbindungselemente – Schrauben und Muttern – Bemaßung (ISO 225:2010); Mehrsprachige Fassung EN ISO 225:2010*

DIN EN ISO 898-1:2013-05,

*Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl – Teil 1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen – Regelgewinde und Feingewinde (ISO 898-1:2013); Deutsche Fassung EN ISO 898-1:2013*

DIN ISO 272:1979-10,

*Mechanische Verbindungselemente; Schlüsselweiten für Sechskantschrauben und -muttern*

JSS II 09-1996,

*Sets of Torshear type high strength bolt, hexagon nut and plain washer for structural joints*

SAE J2486:2013-04-15,

*Tension Indicating Washer Tightening Method for Fasteners*

VDI 2230-1:2014-12,

*Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen -  
Zylindrische Einschraubenverbindungen*

VDI/VDE 2862-1:2012-04,

*Mindestanforderungen zum Einsatz von Schraubsystemen und -werkzeugen -  
Anwendungen in der Automobilindustrie*

VDI/VDE 2862-2:2015-02,

*Mindestanforderungen zum Einsatz von Schraubsystemen und -werkzeugen -  
Anwendungen im Anlagen-, Maschinen- und Apparatebau sowie für Flansch-  
verbindungen an drucktragenden Bauteilen*

Zulassung ETA-13/0243, 28.05.2013,

*IHF-Stretch Bolt Schraubengarnituren*, IHF-GmbH, gültig von 28.05.2013 bis  
28.05.2018

Zulassung ETA-13/0244, 30.05.2013,

*Schraubengarnituren mit TCB Stud*, Tension Control Bolts Ltd., gültig von  
30.05.2013 bis 30.05.2018

Zulassung Z-14.4-15, 26.02.1997,

*FUCHS HVA-(Hochfeste Vorspann-Abscher-) Schraube*, Fuchs Schraubenwerk  
GmbH, gültig von 26.02.1997 bis 28.02.2002

Zulassung Z-14.4-584, 20.02.2012,

*HV-Verbindungen in Stahlbaukonstruktionen mit TCB Standard und TCB  
Studs*, Tension Control Bolts Ltd., gültig von 20.02.2012 bis 30.11.2014

Zulassung Z-14.4-601, 12.05.2010,

*HV - Schraubengarnitur mit Sechskant Unterlegscheibe Hytorc DISCTM*,  
HYTORC-S Barbarino & Kilp GmbH, gültig von 12.05.2010 bis 31.05.2015

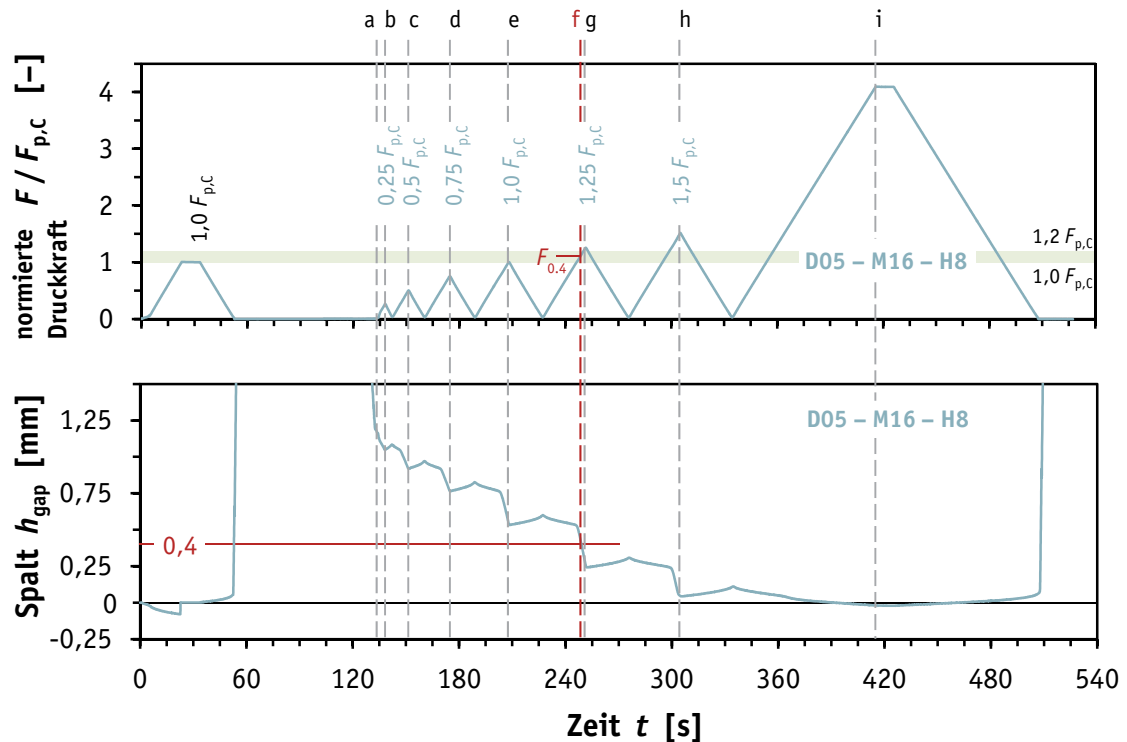
Zulassung Z-14.4-656, 12.02.2014,

*Wartungsfreie GV-Verbindungen mit HRC-Garnituren in BSS-Türmen für  
Windenergieanlagen*, Siemens Wind Power A/S, gültig von 12.02.2014 bis  
12.02.2019



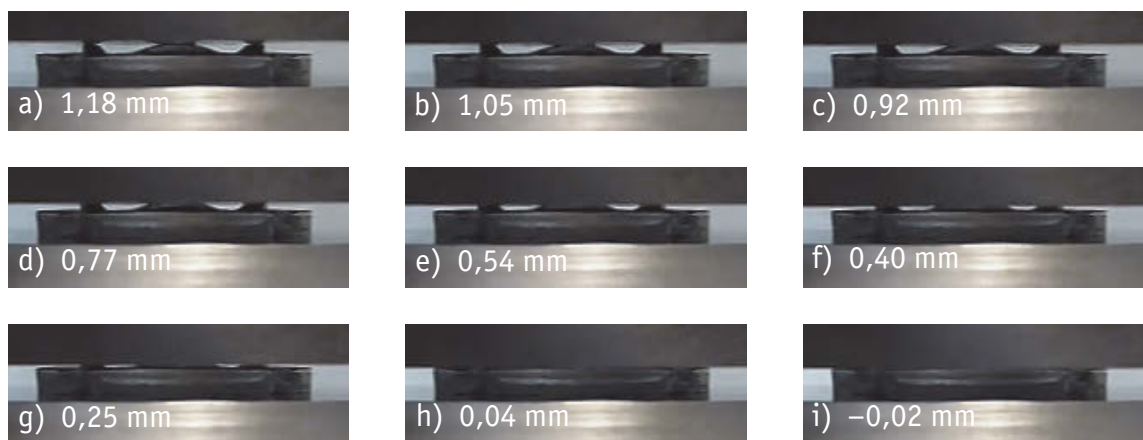
## Anhang A Drucklastversuche

### A.1 Laststufen des erweiterten Prüfablaufs



**Bild A.1.** Laststufen des erweiterten Prüfablaufs, exemplarisch für die Prüfung Nr. D05 (M16 - H8)

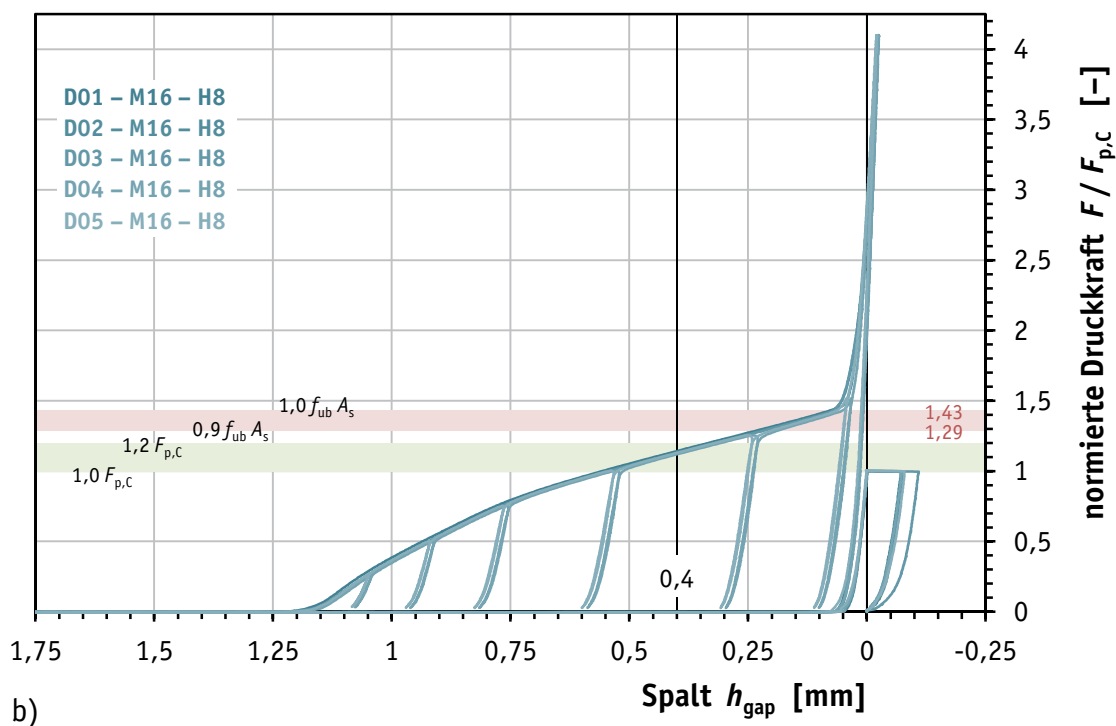
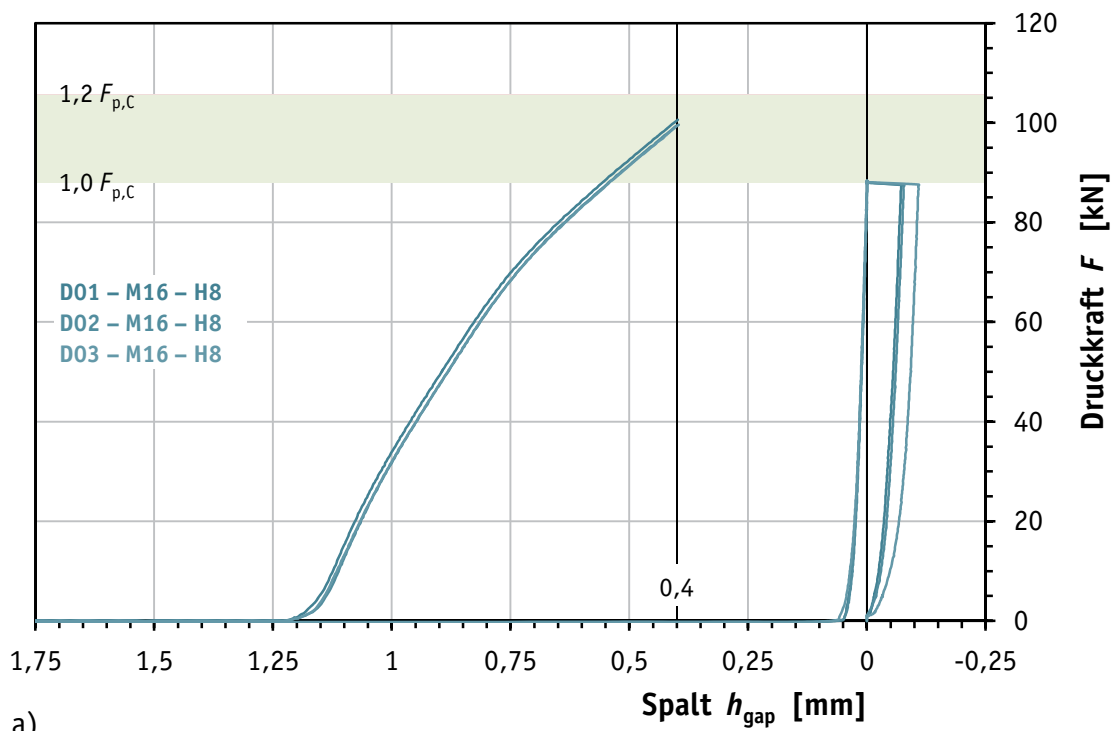
**Figure A.1.** Load steps of the extended test sequence, exemplary for the test No. D05 (M16 - H8)



**Bild A.2.** Vorhandene Spalte  $h_{gap}$  [mm] zu den Laststufen entsprechend Bild A.1

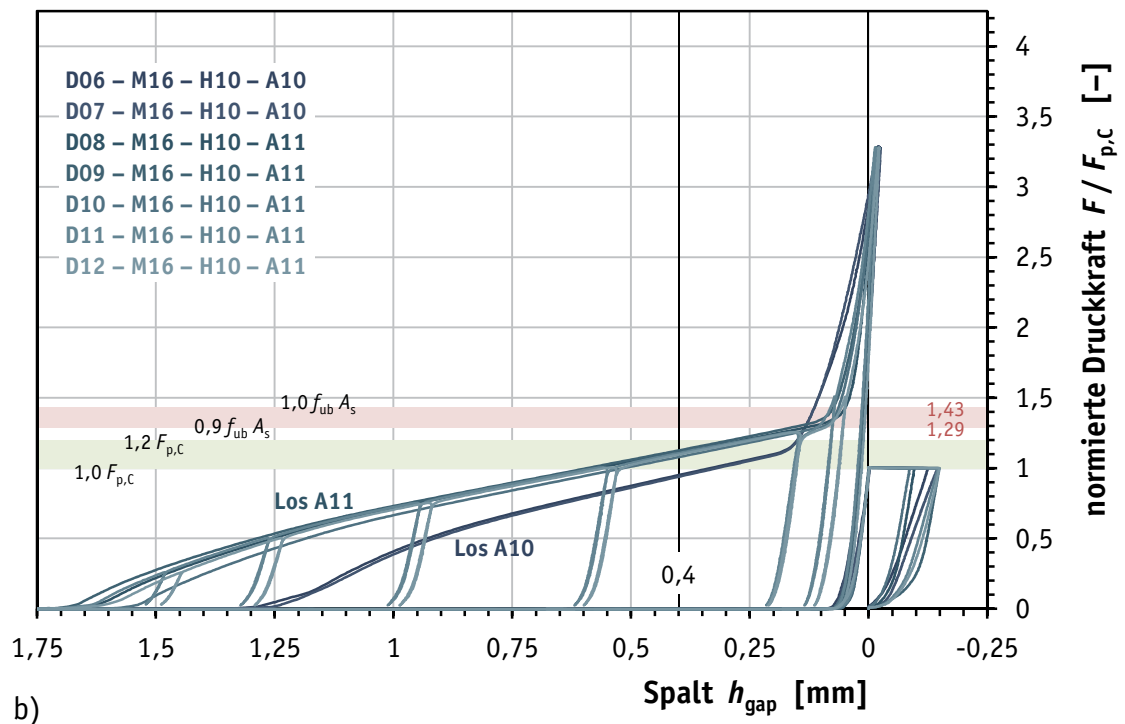
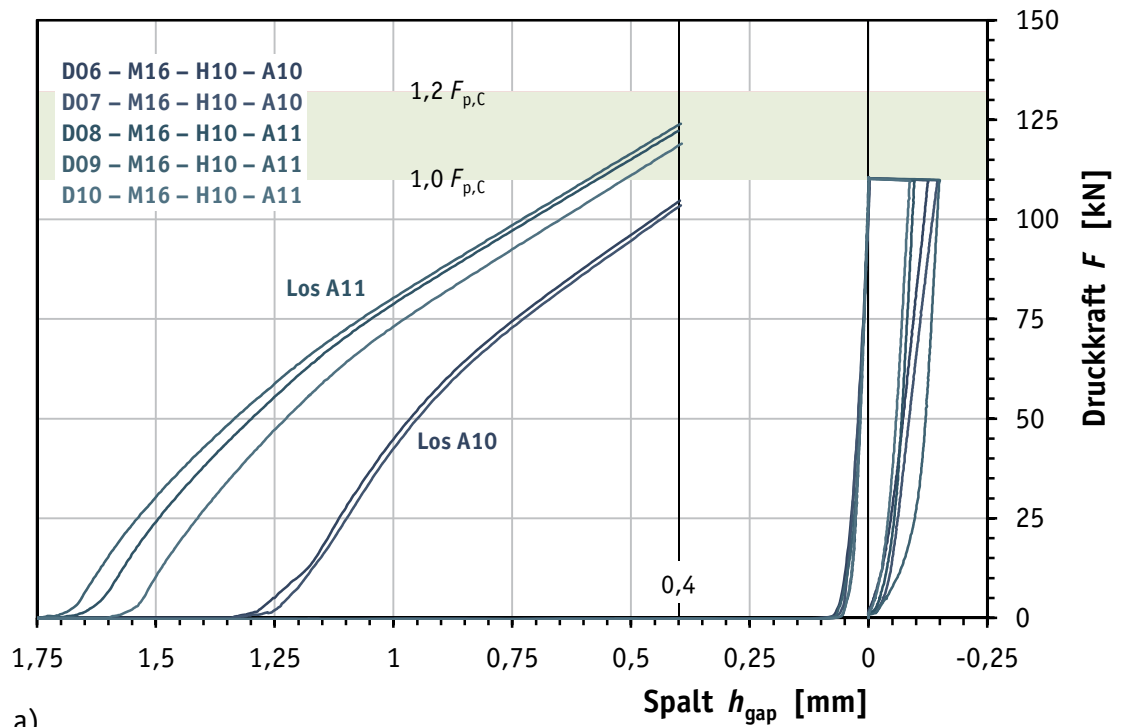
**Figure A.2.** Existing gaps  $h_{gap}$  [mm] in accordance with the load steps in Figure A.1

## A.2 Ergebnisse der Prüfserien



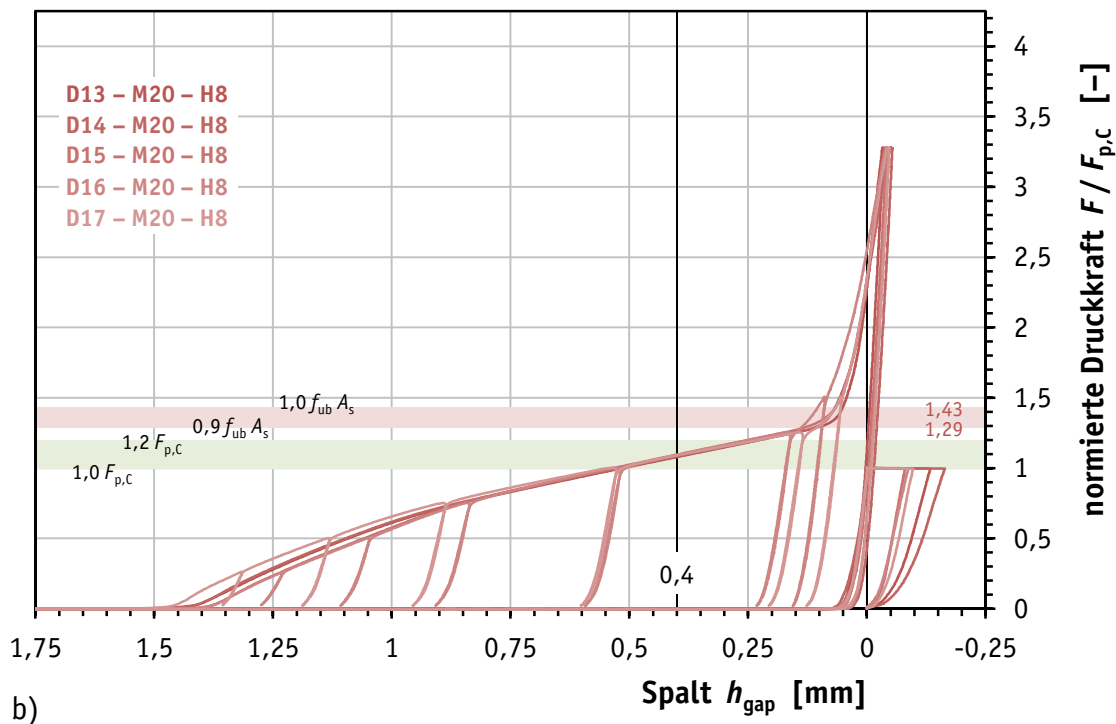
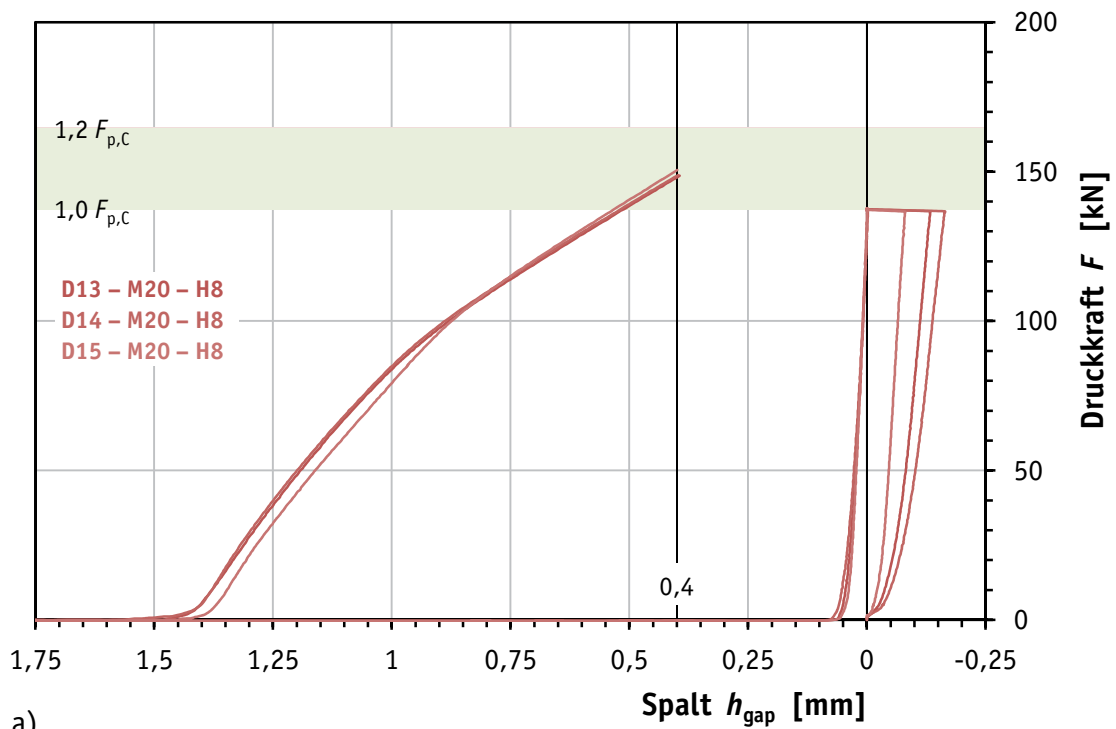
**Bild A.3.** Spalt-Druckkraft-Diagramme für Serie M16 – H8, (a) regulärer Prüfablauf, (b) erweiterter Prüfablauf

**Figure A.3.** Gap-compression load-diagrams of M16 – H8 series, (a) regular test sequence, (b) extended test sequence



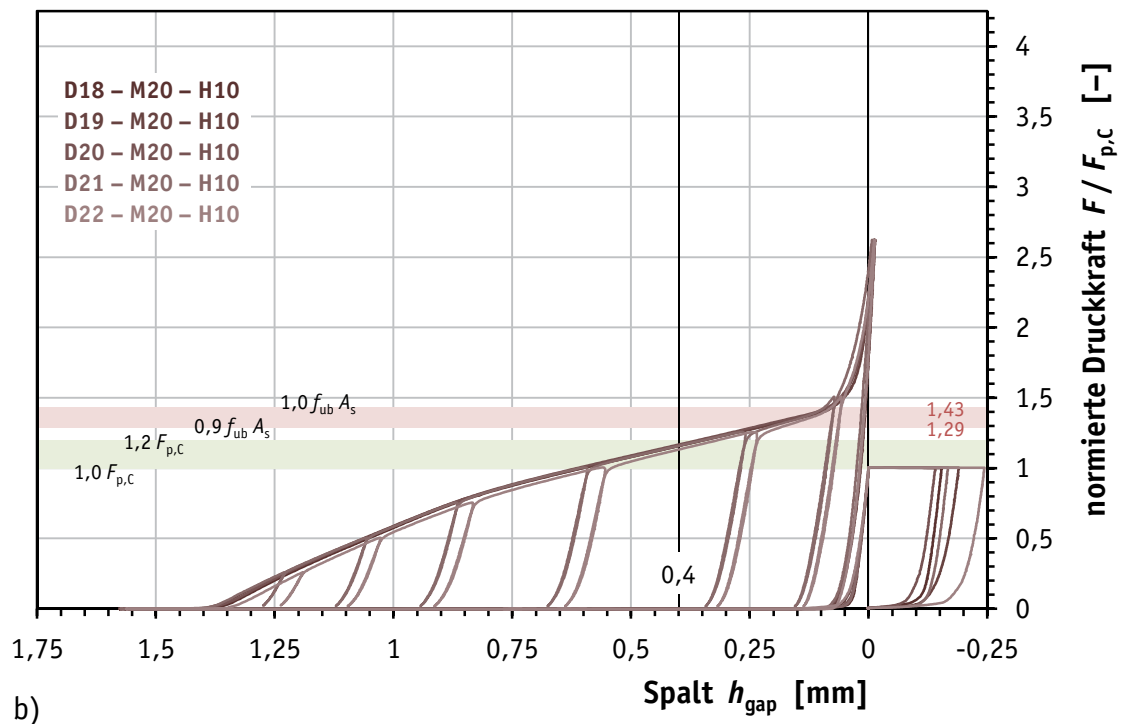
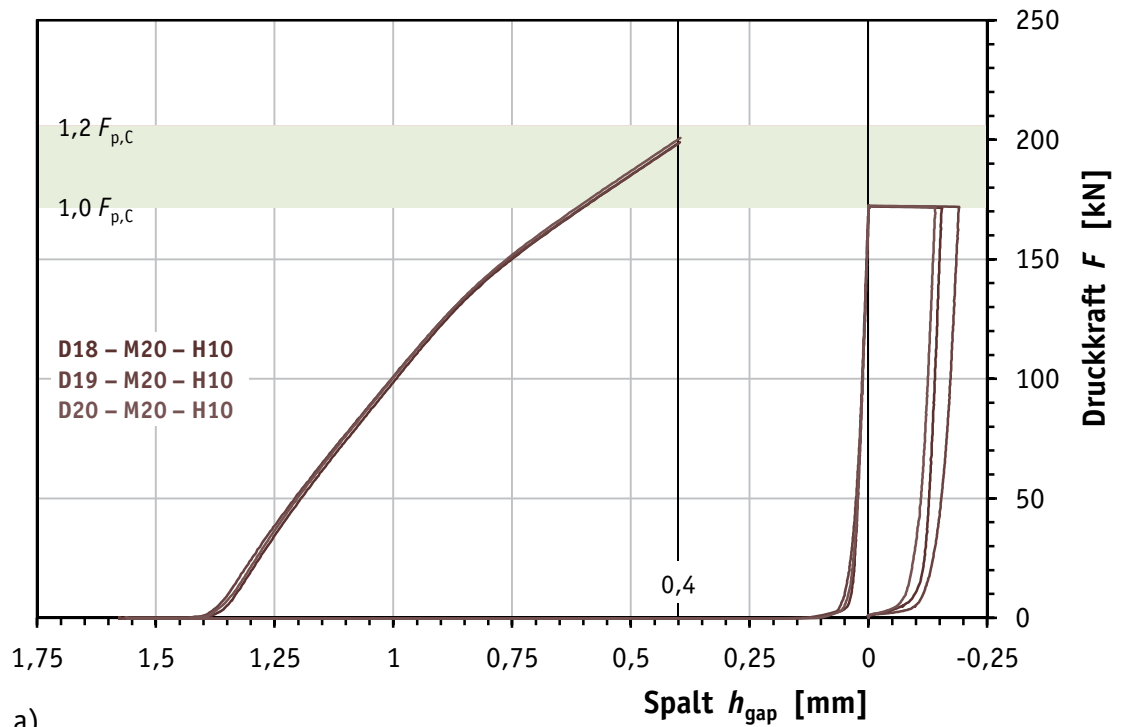
**Bild A.4.** Spalt-Druckkraft-Diagramme für Serie M16 – H10, (a) regulärer Prüfablauf, (b) erweiterter Prüfablauf

**Figure A.4.** Gap-compression load-diagrams of M16 – H10 series, (a) regular test sequence, (b) extended test sequence



**Bild A.5.** Spalt-Druckkraft-Diagramme für Serie M20 – H8, (a) regulärer Prüfablauf, (b) erweiterter Prüfablauf

**Figure A.5.** Gap-compression load-diagrams of M20 – H8 series, (a) regular test sequence, (b) extended test sequence



**Bild A.6.** Spalt-Druckkraft-Diagramme für Serie M20 – H10, (a) regulärer Prüfablauf, (b) erweiterter Prüfablauf

**Figure A.6.** Gap-compression load-diagrams of M20 – H10 series, (a) regular test sequence, (b) extended test sequence
















## Anhang B Anziehversuche

### B.1 Einzelergebnisse der Prüfungen

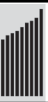













**Tabelle B.1.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A01 (mit DTI)

**Table B.1.** Test results: tightening test No. A01 (including DTI)















M16 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 6 – A01										
$F_S$ [kN]		80	88	89	92	98	104	108	112	124
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,64	0,7	0,71	0,73	0,78	0,83	0,86	0,89	0,98
$F_S / F_{p,C}$ [-]		0,91	1,01	1,02	1,05	1,12	1,18	1,22	1,28	1,41
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,55	0,45	0,45	0,4	0,35	0,25	0,2	0,15	0
	2	0,35	0,25	0,2	0,2	0,125	0	0	0	0
	3	0,35	0,25	0,2	0,2	0,15	0,05	0	0	0
	4	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0
Fühllehre [mm]	0,40									
$n_{refusal}$ [-]		2	3	3	3	4	4	4	4	4
$h_{gap,m}$ [mm]	P1	0,44	0,35	0,31	0,29	0,23	0,14	0,09	0,06	0,01
$R / 2$ [mm]		±0,13	±0,13	±0,15	±0,13	±0,14	±0,15	±0,13	±0,1	±0,03

**Tabelle B.2.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A02 (mit DTI)















**Table B.2.** Test results: tightening test No. A02 (including DTI)

M16 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 7 – A02												
$F_S$	[kN]		76	82	88	91	94	100	106	109	113	126
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,61	0,66	0,7	0,73	0,75	0,8	0,85	0,87	0,9	1,01
$F_S / F_{p,C}$	[-]		0,87	0,94	1,0	1,04	1,07	1,14	1,21	1,24	1,29	1,44
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3	0,2	0,125	0,05	0	0
		2	0,5	0,45	0,35	0,3	0,25	0,15	0,1	0	0	0
		3	0,5	0,45	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0	0
		4	0,4	0,35	0,25	0,25	0,2	0,1	0	0	0	0
Fühllehre	[mm]	0,40										
$n_{refusal}$	[-]		0	1	3	4	4	4	4	4	4	4
$h_{gap,m}$	[mm]	P1	0,5	0,45	0,36	0,33	0,28	0,18	0,11	0,05	0,01	0
$R / 2$	[mm]		±0,08	±0,08	±0,1	±0,08	±0,08	±0,08	±0,1	±0,06	±0,03	±0















**Tabelle B.3.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A03 (mit DTI)**Table B.3.** Test results: tightening test No. A03 (including DTI)

M16 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 8 – A03												
$F_S$	[kN]		76	82	88	91	94	100	106	109	113	126
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,61	0,66	0,7	0,73	0,75	0,8	0,85	0,87	0,9	1,01
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,87	0,94	1,01	1,04	1,07	1,14	1,21	1,25	1,29	1,44
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,5	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0
		2	0,3	0,2	0,15	0,125	0,05	0	0	0	0	0
		3	0,45	0,35	0,25	0,25	0,2	0,15	0,05	0,05	0	0
		4	0,5	0,45	0,35	0,3	0,25	0,2	0,125	0,1	0	0
Fühllehre	[mm]	0,40										
$n_{refusal}$	[-]		1	2	4	4	4	4	4	4	4	4
$h_{gap,m}$	[mm]	P1	0,46	0,38	0,3	0,27	0,21	0,16	0,1	0,08	0,03	0,01
$R / 2$	[mm]		±0,13	±0,15	±0,13	±0,11	±0,13	±0,13	±0,1	±0,06	±0,05	±0,03

**Tabelle B.4.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A04 (mit DTI)**Table B.4.** Test results: tightening test No. A04 (including DTI)















M16 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 9 – A04												
$F_S$	[kN]		76	82	88	91	94	100	106	109	114	126
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,61	0,66	0,7	0,73	0,75	0,8	0,85	0,87	0,9	1,01
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,87	0,94	1,0	1,04	1,07	1,14	1,21	1,24	1,29	1,44
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,5	0,4	0,35	0,3	0,25	0,15	0,1	0,05	0	0
		2	0,4	0,3	0,25	0,2	0,15	0,05	0	0	0	0
		3	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0,15	0	0	0	0
		4	0,5	0,4	0,35	0,3	0,25	0,15	0,05	0	0	0
Fühllehre	[mm]	0,40										
$n_{refusal}$	[-]		0	1	4	4	4	4	4	4	4	4
$h_{gap,m}$	[mm]	P1	0,49	0,4	0,35	0,3	0,25	0,15	0,06	0,03	0,01	0
$R / 2$	[mm]		±0,08	±0,08	±0,08	±0,08	±0,08	±0,08	±0,06	±0,05	±0,03	±0

**Tabelle B.5.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A05 (mit DTI)**Table B.5.** Test results: tightening test No. A05 (including DTI)















M16 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 17 – A05												
$F_S$	[kN]		76	82	88	91	94	100	106	110	114	126
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,61	0,66	0,7	0,73	0,75	0,8	0,85	0,87	0,91	1,01
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,87	0,94	1,0	1,04	1,07	1,14	1,21	1,25	1,29	1,44
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,5	0,4	0,35	0,32	0,3	0,2	0,1	0,06	0	0
		2	0,5	0,4	0,35	0,28	0,25	0,15	0,1	0,06	0,03	0
		3	0,4	0,25	0,15	0,1	0,05	0	0	0	0	0
		4	0,4	0,32	0,25	0,2	0,15	0,075	0	0	0	0
Fühllehre	[mm]	0,25										
$n_{refusal}$	[-]		0	0	1	2	2	4	4	4	4	4
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,48	0,36	0,3	0,24	0,2	0,12	0,06	0,03	0,01	0
$R / 2$	[mm]		±0,08	±0,1	±0,13	±0,13	±0,14	±0,11	±0,06	±0,04	±0,02	±0,02

















**Tabelle B.6.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A06 (mit DTI)**Table B.6.** Test results: tightening test No. A06 (including DTI)

<b>M16 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 18 – A06</b>											
$F_S$ [kN]		76	82	88	91	94	100	106	110	114	126
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,61	0,66	0,7	0,73	0,75	0,8	0,85	0,87	0,91	1,01
$F_S / F_{p,C}$ [-]		0,87	0,94	1,0	1,04	1,07	1,14	1,21	1,25	1,3	1,44
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,5	0,45	0,4	0,35	0,32	0,25	0,2	0,15	0,125	0
	2	0,45	0,35	0,25	0,22	0,2	0,125	0,09	0,06	0,04	0
	3	0,4	0,28	0,15	0,1	0,04	0	0	0	0	0
	4	0,45	0,35	0,28	0,22	0,15	0,05	0	0	0	0
Fühllehre [mm]	0,25										
$n_{refusal}$ [-]		0	0	1	3	3	3	4	4	4	4
$h_{gap,m}$ [mm]	P2	0,48	0,38	0,29	0,24	0,19	0,12	0,08	0,06	0,05	0,01
$R/2$ [mm]		±0,08	±0,11	±0,15	±0,15	±0,16	±0,14	±0,11	±0,09	±0,08	±0,02















**Tabelle B.7.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A07 (mit DTI)**Table B.7.** Test results: tightening test No. A07 (including DTI)

<b>M16 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 19 – A07</b>											
$F_S$ [kN]		76	82	88	91	95	101	107	110	114	126
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,61	0,66	0,7	0,73	0,75	0,8	0,85	0,87	0,91	1,01
$F_S / F_{p,C}$ [-]		0,87	0,94	1,0	1,04	1,07	1,14	1,21	1,25	1,29	1,44
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,5	0,4	0,35	0,32	0,32	0,25	0,2	0,15	0,09	0
	2	0,4	0,35	0,28	0,25	0,2	0,125	0,08	0,05	0	0
	3	0,3	0,18	0,06	0	0	0	0	0	0	0
	4	0,4	0,25	0,125	0,05	0	0	0	0	0	0
Fühllehre [mm]	0,25										
$n_{refusal}$ [-]		0	1	2	2	3	3	4	4	4	4
$h_{gap,m}$ [mm]	P2	0,42	0,31	0,22	0,17	0,14	0,1	0,07	0,06	0,03	0
$R/2$ [mm]		±0,13	±0,14	±0,17	±0,18	±0,18	±0,14	±0,11	±0,09	±0,05	±0,02











**Tabelle B.8.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A08 (mit DTI)**Table B.8.** Test results: tightening test No. A08 (including DTI)

<b>M16 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 20 – A08</b>											
$F_S$ [kN]		76	82	88	91	94	100	107	110	114	126
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,61	0,66	0,7	0,73	0,75	0,8	0,85	0,87	0,91	1,01
$F_S / F_{p,C}$ [-]		0,87	0,94	1,0	1,04	1,07	1,14	1,21	1,25	1,29	1,44
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,5	0,45	0,4	0,35	0,32	0,25	0,18	0,15	0,1	0
	2	0,4	0,35	0,28	0,22	0,2	0,15	0,09	0,06	0	0
	3	0,35	0,25	0,125	0,06	0	0	0	0	0	0
	4	0,4	0,32	0,22	0,15	0,1	0	0	0	0	0
Fühllehre [mm]	0,25										
$n_{refusal}$ [-]		0	0	2	3	3	3	4	4	4	4
$h_{gap,m}$ [mm]	P2	0,44	0,36	0,27	0,21	0,17	0,11	0,07	0,06	0,03	0
$R/2$ [mm]		±0,1	±0,13	±0,16	±0,17	±0,18	±0,14	±0,1	±0,09	±0,06	±0,02











**Tabelle B.9.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A09 (mit DTI)**Table B.9.** Test results: tightening test No. A09 (including DTI)

M16 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 21 – A09												
$F_S$	[kN]		76	82	88	91	94	100	107	110	114	126
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,61	0,66	0,7	0,73	0,75	0,8	0,85	0,87	0,91	1,01
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,87	0,94	1,0	1,04	1,07	1,14	1,21	1,25	1,29	1,44
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,4	0,35	0,28	0,25	0,2	0,15	0,1	0,075	0,04	0
		2	0,35	0,22	0,1	0,04	0	0	0	0	0	0
		3	0,5	0,35	0,25	0,18	0,1	0,04	0	0	0	0
		4	0,5	0,45	0,4	0,35	0,32	0,22	0,15	0,1	0,06	0
Fühllehre	[mm]	0,25										
$n_{refusal}$	[-]		0	1	1	2	3	4	4	4	4	4
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,46	0,37	0,27	0,22	0,17	0,11	0,07	0,05	0,03	0,01
$R / 2$	[mm]		±0,1	±0,14	±0,18	±0,18	±0,18	±0,13	±0,09	±0,06	±0,04	±0,02

**Tabelle B.10.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A10 (mit DTI)**Table B.10.** Test results: tightening test No. A10 (including DTI)

M16 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 11* – A10								
$F_S$	[kN]		94	102	110	117	125	132
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,84
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,86	0,93	1,0	1,06	1,14	1,2
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,2	0,125	0	0	0	0
		2	0,3	0,15	0,1	0	0	0
		3	0,35	0,25	0,125	0	0	0
		4	0,3	0,2	0,1	0	0	0
Fühllehre	[mm]	0,40						
$n_{refusal}$	[-]		4	4	4	4	4	4
$h_{gap,m}$	[mm]	P1	0,31	0,2	0,1	0,02	0	0
$R / 2$	[mm]		±0,1	±0,09	±0,08	±0,03	±0	±0

**Tabelle B.11.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A11 (mit DTI)**Table B.11.** Test results: tightening test No. A11 (including DTI)

M16 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 12* – A11								
$F_S$	[kN]		94	102	110	117	125	132
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,84
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,86	0,93	1,0	1,06	1,14	1,2
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,15	0,125	0	0	0	0
		2	0,4	0,3	0,2	0,125	0,05	0
		3	0,25	0,15	0,05	0	0	0
		4	0,15	0	0	0	0	0
Fühllehre	[mm]	0,40						
$n_{refusal}$	[-]		3	4	4	4	4	4
$h_{gap,m}$	[mm]	P1	0,26	0,17	0,08	0,04	0,02	0,01
$R / 2$	[mm]		±0,15	±0,18	±0,13	±0,08	±0,05	±0,03

**Tabelle B.12.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A12 (mit DTI)**Table B.12.** Test results: tightening test No. A12 (including DTI)

M16 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 13* – A12							
$F_S$ [kN]		94	102	110	117	125	132
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,84
$F_S / F_{p,C}$ [-]		0,86	0,93	1,0	1,06	1,14	1,2
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,25	0,15	0	0	0	0
	2	0,25	0,125	0	0	0	0
	3	0,3	0,2	0,125	0,05	0	0
	4	0,25	0,15	0,125	0	0	0
Fühllehre [mm]	0,40						
$n_{refusal}$ [-]		4	4	4	4	4	4
$h_{gap,m}$ [mm]	P1	0,29	0,18	0,08	0,03	0,01	0
$R / 2$ [mm]		±0,05	±0,06	±0,08	±0,05	±0,03	±0







**Tabelle B.13.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A13 (mit DTI)**Table B.13.** Test results: tightening test No. A13 (including DTI)

M16 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 14* – A13							
$F_S$ [kN]		94	102	110	117	125	Bruch
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	
$F_S / F_{p,C}$ [-]		0,86	0,93	1,0	1,06	1,14	
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,125	0	0	0	0	–
	2	0,25	0,2	0,15	0,05	0	–
	3	0,3	0,25	0,15	0,1	0	–
	4	0,2	0	0	0	0	–
Fühllehre [mm]	0,40						
$n_{refusal}$ [-]		4	4	4	4	4	–
$h_{gap,m}$ [mm]	P1	0,24	0,14	0,09	0,05	0,01	–
$R / 2$ [mm]		±0,11	±0,15	±0,1	±0,06	±0,03	–







**Tabelle B.14.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A14 (mit DTI)**Table B.14.** Test results: tightening test No. A14 (including DTI)

M16 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 15* – A14							
$F_S$ [kN]		94	102	110	117	125	Bruch
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	
$F_S / F_{p,C}$ [-]		0,86	0,93	1,0	1,06	1,14	
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,2	0,15	0,05	0	0	–
	2	0,4	0,25	0,15	0,1	0	–
	3	0,25	0,2	0,1	0	0	–
	4	0,05	0	0	0	0	–
Fühllehre [mm]	0,40						
$n_{refusal}$ [-]		3	4	4	4	4	–
$h_{gap,m}$ [mm]	P1	0,25	0,18	0,09	0,04	0,01	–
$R / 2$ [mm]		±0,2	±0,15	±0,1	±0,06	±0,03	–







**Tabelle B.15.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A15 (mit DTI)**Table B.15.** Test results: tightening test No. A15 (including DTI)

M16 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 16* – A15						
$F_S$ [kN]		94	102	110	117	Bruch
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,6	0,65	0,7	0,75	
$F_S / F_{p,c}$ [-]		0,86	0,93	1,0	1,06	
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,15	0,05	0	0	–
	2	0,25	0,15	0,1	0	–
	3	0,3	0,25	0,15	0	–
	4	0,25	0,15	0	0	–
Fühllehre [mm]	0,40					
$n_{refusal}$ [-]		4	4	4	4	–
$h_{gap,m}$ [mm]	P1	0,26	0,18	0,08	0,01	–
$R / 2$ [mm]		±0,1	±0,13	±0,1	±0,03	–







**Tabelle B.16.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A16 (mit DTI)**Table B.16.** Test results: tightening test No. A16 (including DTI)

M16 – H10 – TS-A10 – Mu.rot – 04* – A16					
$F_S$ [kN]		110	117	125	132
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,7	0,75	0,8	0,84
$F_S / F_{p,c}$ [-]		1,0	1,06	1,14	1,2
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0	0	0	0
	2	0,125	0	0	0
	3	0,125	0	0	0
	4	0	0	0	0
Fühllehre [mm]	0,25				
$n_{refusal}$ [-]		4	4	4	4
$h_{gap,m}$ [mm]	P0	0,13	0,03	0	0
$R / 2$ [mm]		±0,13	±0,06	±0	±0






**Tabelle B.17.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A17 (mit DTI)**Table B.17.** Test results: tightening test No. A17 (including DTI)

M16 – H10 – TS-A10 – Mu.rot – 05* – A17					
$F_S$ [kN]		110	117	125	132
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,7	0,75	0,8	0,84
$F_S / F_{p,c}$ [-]		1,0	1,06	1,14	1,2
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0
	3	0,125	0,125	0	0
	4	0,125	0,125	0	0
Fühllehre [mm]	0,25				
$n_{refusal}$ [-]		4	4	4	4
$h_{gap,m}$ [mm]	P0	0,13	0,09	0,03	0
$R / 2$ [mm]		±0,13	±0,13	±0,06	±0







**Tabelle B.18.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A18 (mit DTI)**Table B.18.** Test results: tightening test No. A18 (including DTI)

M16 – H10 – TS-A10 – Mu.rot – 06* – A18					
$F_S$ [kN]		110	117	125	132
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,7	0,75	0,8	0,84
$F_S / F_{p,C}$ [-]		1,0	1,06	1,14	1,2
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,125	0	0	0
	2	0,125	0	0	0
	3	0,125	0,125	0	0
	4	0,125	0	0	0
Fühllehre [mm]	0,25				
$n_{refusal}$ [-]		4	4	4	4
$h_{gap,m}$ [mm]	P0	0,19	0,09	0,02	0
$R / 2$ [mm]		±0,06	±0,13	±0,06	±0





**Tabelle B.19.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A19 (mit DTI)**Table B.19.** Test results: tightening test No. A19 (including DTI)

M16 – H10 – TS-A10 – Mu.rot – 07* – A19				
$F_S$ [kN]		110	117	Bruch
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,7	0,75	
$F_S / F_{p,C}$ [-]		1,0	1,06	
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0	0	–
	2	0	0	–
	3	0,125	0,125	–
	4	0,125	0,125	–
Fühllehre [mm]	0,25			
$n_{refusal}$ [-]		4	4	–
$h_{gap,m}$ [mm]	P0	0,13	0,09	–
$R / 2$ [mm]		±0,13	±0,13	–












**Tabelle B.20.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A20 (mit DTI)**Table B.20.** Test results: tightening test No. A20 (including DTI)

M16 – H10 – TS-A10 – Mu.rot – 08* – A20					
$F_S$ [kN]		110	117	125	132
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,7	0,75	0,8	0,84
$F_S / F_{p,C}$ [-]		1,0	1,06	1,14	1,2
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0
	3	0,125	0,125	0	0
	4	0,125	0,125	0,125	0
Fühllehre [mm]	0,25				
$n_{refusal}$ [-]		4	4	4	4
$h_{gap,m}$ [mm]	P0	0,13	0,09	0,06	0,02
$R / 2$ [mm]		±0,13	±0,13	±0,13	±0,06












**Tabelle B.21.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A21 (mit DTI)**Table B.21.** Test results: tightening test No. A21 (including DTI)

M16 – H10 – TS-A10 – Mu.rot – 09* – A21				
$F_S$	[kN]		110	117 Bruch
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,7	0,75
$F_S / F_{p,c}$	[-]		1,0	1,06
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0	0 –
		2	0,125	0 –
		3	0,125	0,125 –
		4	0,125	0 –
Fühllehre	[mm]	0,25		
$n_{refusal}$	[-]		4	4 –
$h_{gap,m}$	[mm]	P0	0,16	0,08 –
$R / 2$	[mm]		$\pm 0,13$	$\pm 0,13$ –














**Tabelle B.22.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A53 (mit DTI)**Table B.22.** Test results: tightening test No. A53 (including DTI)

M20 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 6 – A53											
$F_S$	[kN]		118	129	138	143	147	156	165	171	177
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,6	0,66	0,7	0,73	0,75	0,79	0,84	0,87	0,91
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,86	0,94	1,0	1,04	1,07	1,13	1,2	1,24	1,29
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,5	0,5	0,4	0,32	0,25	0,18	0,08	0	0
		2	0,65	0,55	0,45	0,4	0,32	0,22	0,1	0,03	0
		3	0,6	0,5	0,4	0,32	0,28	0,2	0,09	0,03	0
		4	0,5	0,4	0,32	0,28	0,25	0,15	0,075	0	0
		5	0,5	0,4	0,32	0,25	0,22	0,15	0,08	0	0
Fühllehre	[mm]	0,40									
$n_{refusal}$	[-]		0	0	2	4	5	5	5	5	5
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,58	0,5	0,4	0,33	0,28	0,19	0,09	0,02	0,01
$R / 2$	[mm]		±0,1	±0,1	±0,09	±0,1	±0,07	±0,05	±0,02	±0,02	±0,02














**Tabelle B.23.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A54 (mit DTI)**Table B.23.** Test results: tightening test No. A54 (including DTI)

M20 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 7 – A54											
$F_S$	[kN]		119	128	137	142	147	156	164	171	177
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,6	0,66	0,7	0,73	0,75	0,79	0,84	0,87	0,9
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,86	0,94	1,0	1,04	1,07	1,13	1,2	1,24	1,29
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,55	0,5	0,4	0,32	0,3	0,22	0,125	0,06	0
		2	0,65	0,55	0,45	0,4	0,35	0,25	0,15	0,09	0,03
		3	0,7	0,6	0,5	0,4	0,35	0,28	0,18	0,125	0,03
		4	0,65	0,55	0,4	0,35	0,35	0,25	0,2	0,125	0,1
		5	0,6	0,5	0,4	0,35	0,32	0,25	0,18	0,12	0,07
Fühllehre	[mm]	0,40									
$n_{refusal}$	[-]		0	0	0	3	5	5	5	5	5
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,66	0,57	0,46	0,39	0,35	0,26	0,18	0,11	0,05
$R / 2$	[mm]		±0,1	±0,08	±0,08	±0,07	±0,05	±0,04	±0,05	±0,05	±0,06














**Tabelle B.24.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A55 (mit DTI)**Table B.24.** Test results: tightening test No. A55 (including DTI)

M20 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 8 – A55										
$F_S$ [kN]		118	128	138	143	147	156	164	171	177
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,6	0,66	0,7	0,73	0,75	0,79	0,84	0,87	0,9
$F_S / F_{p,C}$ [-]		0,86	0,94	1,0	1,04	1,07	1,13	1,2	1,24	1,29
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,6	0,5	0,45	0,4	0,32	0,3	0,18	0,125	0,08
	2	0,6	0,55	0,45	0,4	0,35	0,25	0,15	0,08	0,03
	3	0,6	0,5	0,35	0,3	0,25	0,15	0,08	0,03	0
	4	0,55	0,4	0,32	0,28	0,25	0,15	0,09	0,05	0
	5	0,55	0,45	0,4	0,35	0,28	0,25	0,2	0,15	0,1
Fühllehre [mm]	0,40									
$n_{refusal}$ [-]		0	0	2	3	5	5	5	5	5
$h_{gap,m}$ [mm]	P2	0,61	0,51	0,42	0,37	0,31	0,23	0,15	0,1	0,05
$R / 2$ [mm]		±0,05	±0,1	±0,09	±0,09	±0,08	±0,09	±0,07	±0,08	±0,06














**Tabelle B.25.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A56 (mit DTI)**Table B.25.** Test results: tightening test No. A56 (including DTI)

M20 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 19 – A56										
$F_S$ [kN]		118	128	137	143	147	156	165	171	177
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,6	0,66	0,7	0,73	0,75	0,79	0,84	0,87	0,91
$F_S / F_{p,C}$ [-]		0,86	0,94	1,0	1,04	1,07	1,13	1,2	1,25	1,29
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,6	0,55	0,4	0,4	0,32	0,22	0,1	0	0
	2	0,55	0,45	0,35	0,32	0,25	0,18	0,1	0,05	0
	3	0,5	0,35	0,22	0,125	0,08	0	0	0	0
	4	0,5	0,35	0,25	0,2	0,15	0	0	0	0
	5	0,55	0,4	0,3	0,25	0,18	0,08	0	0	0
Fühllehre [mm]	0,25									
$n_{refusal}$ [-]		0	0	1	2	3	5	5	5	5
$h_{gap,m}$ [mm]	P2	0,57	0,45	0,32	0,27	0,21	0,11	0,05	0,01	0
$R / 2$ [mm]		±0,08	±0,13	±0,12	±0,16	±0,14	±0,13	±0,06	±0,03	±0,02














**Tabelle B.26.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A57 (mit DTI)**Table B.26.** Test results: tightening test No. A57 (including DTI)

M20 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 20 – A57										
$F_S$ [kN]		118	128	137	143	147	155	165	171	177
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,6	0,66	0,7	0,73	0,75	0,79	0,84	0,87	0,9
$F_S / F_{p,C}$ [-]		0,86	0,94	1,0	1,04	1,07	1,13	1,2	1,25	1,29
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,45	0,32	0,22	0,15	0,125	0,04	0	0	0
	2	0,55	0,4	0,3	0,22	0,15	0,08	0	0	0
	3	0,65	0,5	0,4	0,32	0,3	0,15	0,08	0	0
	4	0,7	0,55	0,45	0,35	0,3	0,2	0,08	0,03	0
	5	0,5	0,4	0,35	0,28	0,22	0,125	0	0	0
Fühllehre [mm]	0,25									
$n_{refusal}$ [-]		0	0	1	2	3	5	5	5	5
$h_{gap,m}$ [mm]	P2	0,6	0,46	0,36	0,28	0,23	0,13	0,04	0,01	0
$R / 2$ [mm]		±0,15	±0,14	±0,14	±0,13	±0,1	±0,09	±0,05	±0,02	±0,02














**Tabelle B.27.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A58 (mit DTI)**Table B.27.** Test results: tightening test No. A58 (including DTI)

M20 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 21 – A58										
$F_S$ [kN]		118	128	137	143	147	155	165	171	178
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,6	0,66	0,7	0,73	0,75	0,79	0,84	0,87	0,91
$F_S / F_{p,c}$ [-]		0,86	0,94	1,0	1,04	1,07	1,13	1,2	1,25	1,29
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,6	0,4	0,32	0,25	0,18	0,06	0	0	0
	2	0,45	0,35	0,28	0,2	0,15	0,05	0	0	0
	3	0,4	0,3	0,22	0,15	0,1	0	0	0	0
	4	0,65	0,5	0,4	0,32	0,25	0,15	0,06	0	0
	5	0,6	0,5	0,4	0,35	0,28	0,15	0,03	0	0
Fühllehre [mm]	0,25									
$n_{refusal}$ [-]		0	0	1	2	3	5	5	5	5
$h_{gap,m}$ [mm]	P2	0,57	0,43	0,34	0,27	0,2	0,09	0,03	0,01	0
$R / 2$ [mm]		±0,15	±0,13	±0,12	±0,13	±0,1	±0,09	±0,04	±0,02	±0

**Tabelle B.28.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A59 (mit DTI)**Table B.28.** Test results: tightening test No. A59 (including DTI)

M20 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 22 – A59										
$F_S$ [kN]		118	128	137	143	147	156	165	171	177
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,6	0,65	0,7	0,73	0,75	0,79	0,84	0,87	0,91
$F_S / F_{p,c}$ [-]		0,86	0,94	1,0	1,04	1,07	1,13	1,2	1,25	1,29
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,55	0,4	0,3	0,22	0,15	0,03	0	0	0
	2	0,65	0,55	0,45	0,4	0,35	0,25	0,2	0,12	0,09
	3	0,5	0,4	0,35	0,32	0,25	0,2	0,125	0,06	0
	4	0,5	0,4	0,3	0,22	0,15	0,1	0,08	0,05	0
	5	0,5	0,4	0,22	0,125	0,04	0	0	0	0
Fühllehre [mm]	0,25									
$n_{refusal}$ [-]		0	0	1	3	3	4	5	5	5
$h_{gap,m}$ [mm]	P2	0,57	0,46	0,34	0,27	0,2	0,13	0,09	0,05	0,03
$R / 2$ [mm]		±0,1	±0,1	±0,14	±0,16	±0,18	±0,14	±0,11	±0,06	±0,05

**Tabelle B.29.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A60 (mit DTI)**Table B.29.** Test results: tightening test No. A60 (including DTI)

M20 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 23 – A60										
$F_S$ [kN]		118	128	137	142	147	155	165	171	177
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,6	0,66	0,7	0,73	0,75	0,79	0,84	0,87	0,91
$F_S / F_{p,c}$ [-]		0,86	0,94	1,0	1,04	1,07	1,13	1,2	1,25	1,29
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,55	0,4	0,32	0,25	0,15	0,05	0	0	0
	2	0,6	0,5	0,4	0,35	0,35	0,25	0,15	0,1	0,05
	3	0,7	0,55	0,4	0,35	0,32	0,2	0,12	0,08	0,05
	4	0,6	0,45	0,35	0,32	0,25	0,15	0,03	0	0
	5	0,55	0,4	0,25	0,15	0,1	0	0	0	0
Fühllehre [mm]	0,25									
$n_{refusal}$ [-]		0	0	0	1	2	4	5	5	5
$h_{gap,m}$ [mm]	P2	0,63	0,49	0,37	0,3	0,25	0,14	0,07	0,04	0,02
$R / 2$ [mm]		±0,1	±0,1	±0,1	±0,13	±0,15	±0,14	±0,09	±0,06	±0,03



**Tabelle B.30.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A61 (mit DTI)**Table B.30.** Test results: tightening test No. A61 (including DTI)

M20 – H10 – TS-22AA – Shr.fix – 11* – A61							
$F_S$ [kN]		148	160	172	183	195	206
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,84
$F_S / F_{p,C}$ [-]		0,86	0,93	1,0	1,07	1,14	1,2
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,55	0,5	0,4	0,3	0,2	0,125
	2	0,4	0,3	0,2	0,125	0	0
	3	0,2	0,1	0	0	0	0
	4	0,15	0	0	0	0	0
	5	0,3	0,15	0,125	0	0	0
	6	0,5	0,4	0,35	0,3	0,25	0,15
Fühllehre [mm]	0,40						
$n_{refusal}$ [-]		3	4	5	6	6	6
$h_{gap,m}$ [mm]	P1	0,38	0,26	0,2	0,14	0,09	0,05
$R / 2$ [mm]		±0,23	±0,28	±0,23	±0,18	±0,15	±0,1









**Tabelle B.31.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A62 (mit DTI)**Table B.31.** Test results: tightening test No. A62 (including DTI)

M20 – H10 – TS-22AA – Shr.fix – 12* – A62							
$F_S$ [kN]		148	160	172	183	195	206
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,84
$F_S / F_{p,C}$ [-]		0,86	0,93	1,0	1,07	1,14	1,2
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,45	0,3	0,25	0,15	0	0
	2	0,3	0,2	0,1	0	0	0
	3	0,25	0,15	0	0	0	0
	4	0,3	0,2	0,125	0	0	0
	5	0,4	0,35	0,25	0,2	0	0,05
	6	0,5	0,4	0,3	0,25	0,125	0,05
Fühllehre [mm]	0,40						
$n_{refusal}$ [-]		3	5	6	6	6	6
$h_{gap,m}$ [mm]	P1	0,39	0,29	0,19	0,12	0,03	0,03
$R / 2$ [mm]		±0,15	±0,15	±0,18	±0,15	±0,08	±0,05






**Tabelle B.32.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A63 (mit DTI)**Table B.32.** Test results: tightening test No. A63 (including DTI)

M20 – H10 – TS-22AA – Shr.fix – 13* – A63							
$F_S$ [kN]		148	160	172	183	195	206
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,84
$F_S / F_{p,C}$ [-]		0,86	0,93	1,0	1,07	1,14	1,2
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,65	0,55	0,45	0,4	0,35	0,25
	2	0,4	0,3	0,2	0,125	0,05	0
	3	0,25	0,125	0	0	0	0
	4	0,4	0,25	0,15	0	0	0
	5	0,5	0,4	0,25	0,2	0,15	0,05
	6	0,55	0,5	0,4	0,35	0,25	0,15
Fühllehre [mm]	0,40						
$n_{refusal}$ [-]		1	3	4	5	6	6
$h_{gap,m}$ [mm]	P1	0,48	0,38	0,27	0,2	0,15	0,09
$R / 2$ [mm]		±0,23	±0,24	±0,25	±0,23	±0,2	±0,15









**Tabelle B.33.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A64 (mit DTI)**Table B.33.** Test results: tightening test No. A64 (including DTI)

M20 – H10 – TS-22AA – Shr.fix – 14* – A64								
$F_S$	[kN]		148	160	172	183	195	Bruch
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,86	0,93	1,0	1,07	1,14	
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,55	0,5	0,4	0,3	0,2	–
		2	0,55	0,45	0,35	0,25	0,125	–
		3	0,5	0,35	0,2	0,125	0	–
		4	0,25	0,15	0	0	0	–
		5	0,25	0,125	0	0	0	–
		6	0,3	0,25	0,15	0,125	0,125	–
Fühllehre	[mm]	0,40						
$n_{refusal}$	[-]		3	4	5	6	6	–
$h_{gap,m}$	[mm]	P1	0,43	0,33	0,21	0,15	0,09	–
$R / 2$	[mm]		±0,18	±0,21	±0,23	±0,18	±0,13	–

**Tabelle B.34.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A65 (mit DTI)**Table B.34.** Test results: tightening test No. A65 (including DTI)

M20 – H10 – TS-22AA – Shr.fix – 15* – A65							
$F_S$	[kN]		Bruch				
$F_S / F_{ub}$	[-]						
$F_S / F_{p,c}$	[-]						
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	–				
		2	–				
		3	–				
		4	–				
		5	–				
		6	–				
Fühllehre	[mm]	0,40					
$n_{refusal}$	[-]		–				
$h_{gap,m}$	[mm]	P1	–				
$R / 2$	[mm]		–				

**Tabelle B.35.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A66 (mit DTI)**Table B.35.** Test results: tightening test No. A66 (including DTI)

M20 – H10 – TS-22AA – Shr.fix – 16* – A66								
$F_S$	[kN]		148	160	172	183	195	Bruch
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,86	0,93	1,0	1,07	1,14	
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,55	0,45	0,4	0,25	0,2	–
		2	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	–
		3	0,4	0,25	0,2	0,125	0	–
		4	0,15	0,05	0	0	0	–
		5	0,15	0	0	0	0	–
		6	0,3	0,25	0,15	0,1	0	–
Fühllehre	[mm]	0,40						
$n_{refusal}$	[-]		3	4	5	6	6	–
$h_{gap,m}$	[mm]	P1	0,38	0,27	0,2	0,13	0,08	–
$R / 2$	[mm]		±0,23	±0,25	±0,23	±0,15	±0,13	–

**Tabelle B.36.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A67 (mit DTI)**Table B.36.** Test results: tightening test No. A67 (including DTI)

M20 – H10 – TS-22AA – Mu.rot – 05* – A67					
$F_S$ [kN]		172	183	195	206
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,7	0,75	0,8	0,84
$F_S / F_{p,C}$ [-]		1,0	1,07	1,14	1,2
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,4	0,4	0,25	0,125
	2	0,4	0,25	0,25	0,125
	3	0,25	0,125	0,125	0
	4	0,25	0,125	0,125	0
	5	0,4	0,25	0,25	0,125
	6	0,4	0,4	0,25	0,125
Fühllehre [mm]	0,25				
$n_{refusal}$ [-]		0	2	2	6
$h_{gap,m}$ [mm]	P0	0,51	0,37	0,28	0,15
$R / 2$ [mm]		±0,28	±0,34	±0,14	±0,13







**Tabelle B.37.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A68 (mit DTI)**Table B.37.** Test results: tightening test No. A68 (including DTI)

M20 – H10 – TS-22AA – Mu.rot – 06* – A68					
$F_S$ [kN]		172	183	195	206
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,7	0,75	0,8	0,84
$F_S / F_{p,C}$ [-]		1,0	1,07	1,14	1,2
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,4	0,4	0,25	0,125
	2	0,4	0,25	0,25	0,125
	3	0,25	0,25	0,125	0
	4	0,125	0,125	0	0
	5	0,125	0	0	0
	6	0,25	0,25	0,125	0
Fühllehre [mm]	0,25				
$n_{refusal}$ [-]		2	2	4	6
$h_{gap,m}$ [mm]	P0	0,37	0,3	0,18	0,08
$R / 2$ [mm]		±0,34	±0,4	±0,2	±0,13







**Tabelle B.38.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A69 (mit DTI)**Table B.38.** Test results: tightening test No. A69 (including DTI)

M20 – H10 – TS-22AA – Mu.rot – 07* – A69					
$F_S$ [kN]		172	183	195	206
$F_S / F_{ub}$ [-]		0,7	0,75	0,8	0,84
$F_S / F_{p,C}$ [-]		1,0	1,07	1,14	1,2
$h_{gap,inf}$ [mm]	1	0,4	0,25	0,25	0,125
	2	0,4	0,25	0,25	0,125
	3	0,25	0,25	0,125	0,125
	4	0,25	0,125	0,125	0
	5	0,25	0,125	0,125	0
	6	0,4	0,25	0,125	0
Fühllehre [mm]	0,25				
$n_{refusal}$ [-]		0	2	4	6
$h_{gap,m}$ [mm]	P0	0,46	0,28	0,23	0,13
$R / 2$ [mm]		±0,28	±0,14	±0,14	±0,13







**Tabelle B.39.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A70 (mit DTI)**Table B.39.** Test results: tightening test No. A70 (including DTI)

M20 – H10 – TS-22AA – Mu.rot – 08* – A70						
$F_S$	[kN]		172	183	195	206
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,7	0,75	0,8	0,84
$F_S / F_{p,c}$	[-]		1,0	1,07	1,14	1,2
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0	0	0	0
		2	0,125	0	0	0
		3	0,25	0,125	0	0
		4	0,25	0,25	0,125	0
		5	0,25	0,25	0,125	0
		6	0,125	0	0	0
Fühllehre	[mm]	0,25				
$n_{refusal}$	[-]		3	4	6	6
$h_{gap,m}$	[mm]	P0	0,24	0,16	0,07	0,02
$R / 2$	[mm]		±0,2	±0,2	±0,13	±0,06

**Tabelle B.40.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A71 (mit DTI)**Table B.40.** Test results: tightening test No. A71 (including DTI)

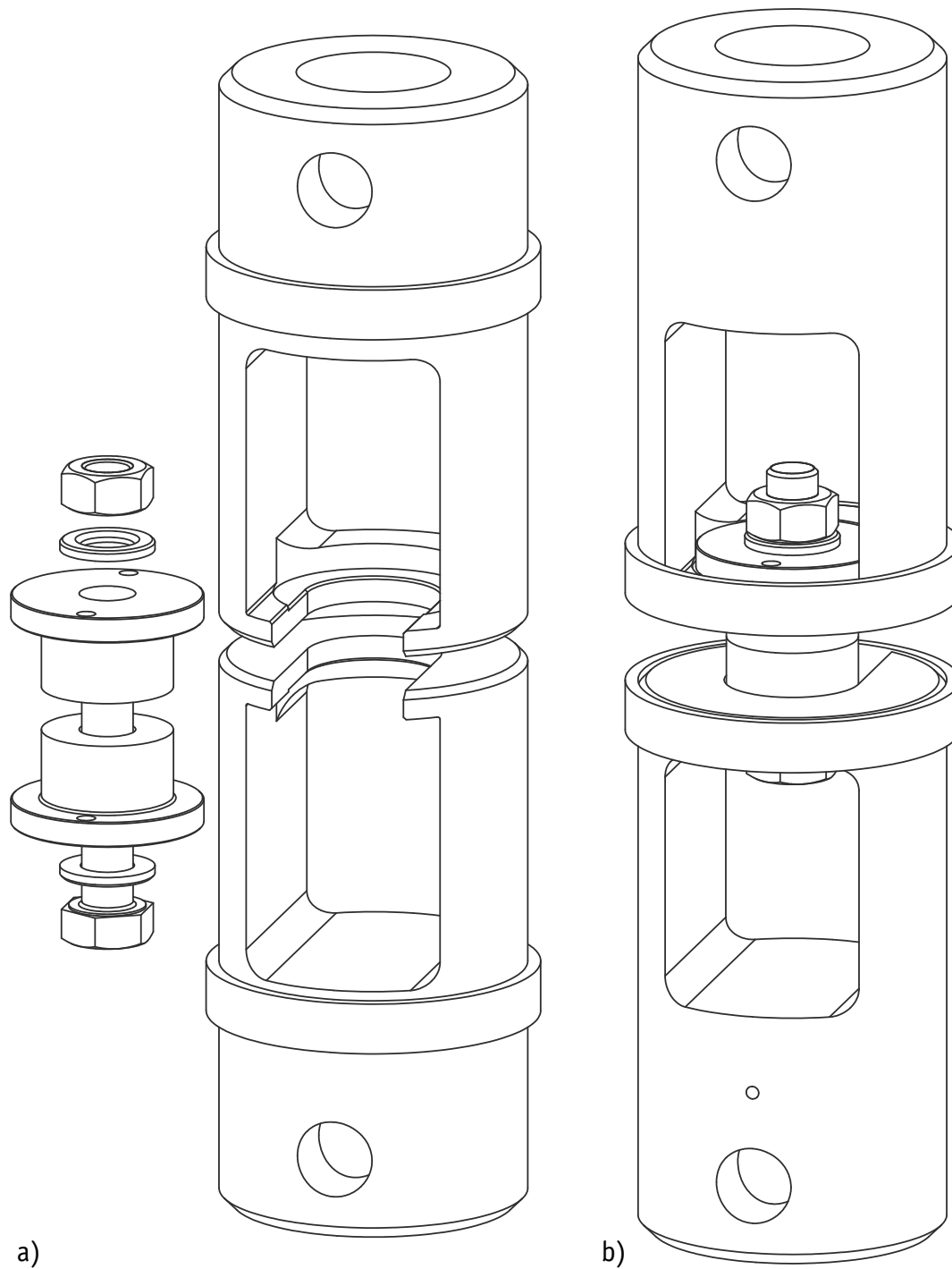
M20 – H10 – TS-22AA – Mu.rot – 09* – A71						
$F_S$	[kN]		172	183	195	206
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,7	0,75	0,8	0,84
$F_S / F_{p,c}$	[-]		1,0	1,07	1,14	1,2
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,4	0,4	0,25	0,25
		2	0,25	0,125	0,125	0,125
		3	0,125	0	0	0
		4	0,125	0	0	0
		5	0,25	0,25	0,125	0
		6	0,4	0,4	0,25	0,125
Fühllehre	[mm]	0,25				
$n_{refusal}$	[-]		2	3	4	5
$h_{gap,m}$	[mm]	P0	0,37	0,31	0,17	0,13
$R / 2$	[mm]		±0,34	±0,4	±0,2	±0,2

**Tabelle B.41.** Prüfergebnisse: Anziehversuch Nr. A72 (mit DTI)**Table B.41.** Test results: tightening test No. A72 (including DTI)

M20 – H10 – TS-22AA – Mu.rot – 10* – A72						
$F_S$	[kN]		172	183	195	Bruch
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,7	0,75	0,8	
$F_S / F_{p,c}$	[-]		1,0	1,07	1,14	
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,25	0,25	0,125	–
		2	0,4	0,25	0,25	–
		3	0,4	0,4	0,25	–
		4	0,25	0,25	0,125	–
		5	0,25	0,125	0	–
		6	0,25	0,125	0	–
Fühllehre	[mm]	0,25				
$n_{refusal}$	[-]		0	2	4	–
$h_{gap,m}$	[mm]	P0	0,42	0,33	0,19	–
$R / 2$	[mm]		±0,28	±0,34	±0,2	–

## C.1 Kalibrierung der Prüfschrauben

## C.2 Prüfvorrichtung für Bauteil-Zugversuche



**Bild C.2.** Prüfvorrichtung für Bauteil-Zugversuche: (a) Montage der Bauteile, (b) Zugversuch an vorgespannten Bauteilen

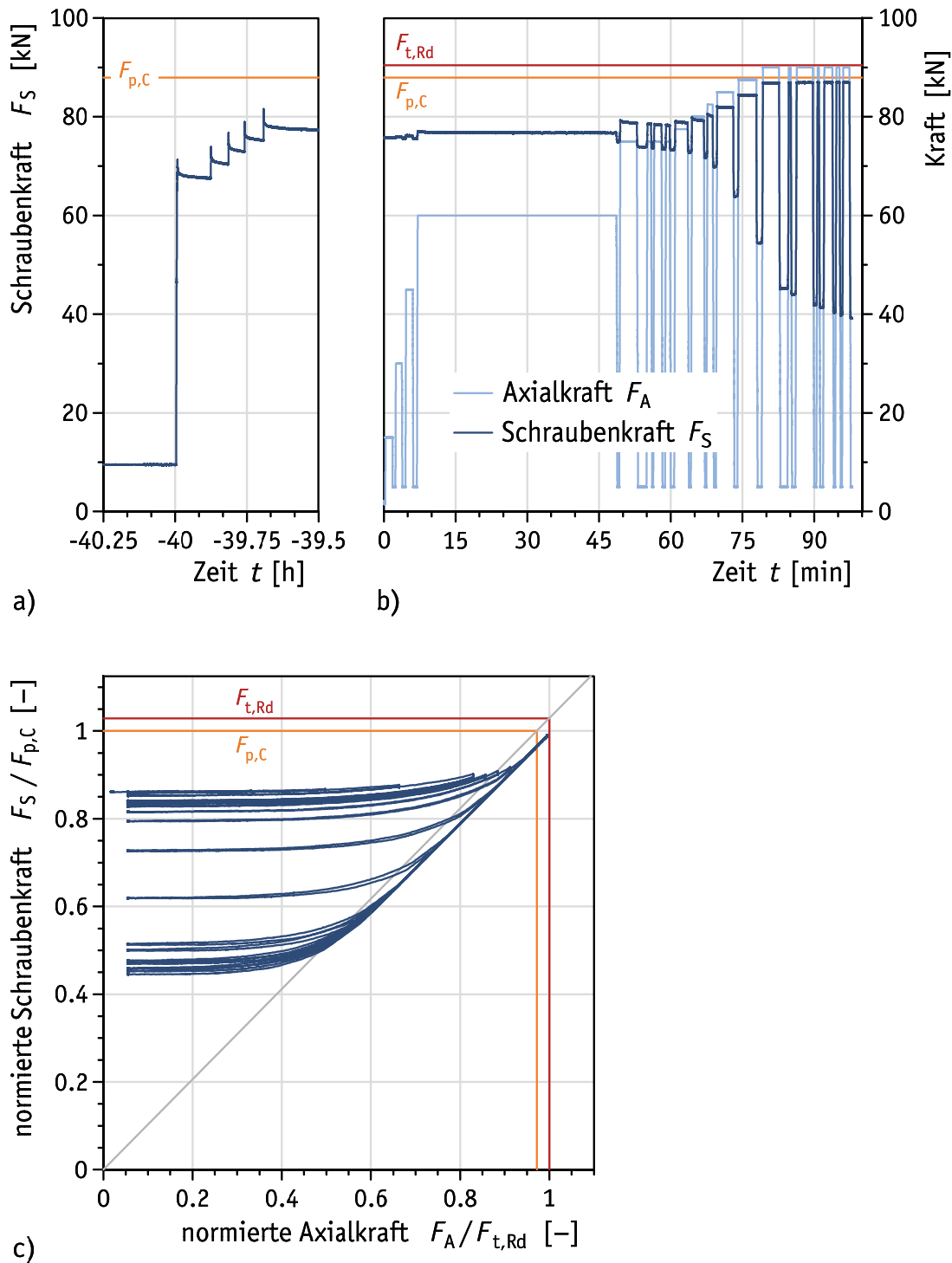
**Figure C.2.** Test device for the component tensile tests: (a) assembly of the components, (b) tensile test of preloaded components



### C.3 Einzelergebnisse der Prüfungen

**M16 × 90 – 70 – Shr061 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 10 – Z01**

Shr.HV | Shb.HB | DTI.H8 | 59,5 | Shb.H | Mu.HV.rot





**Bild C.3.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z01 (mit DTI)

**Figure C.3.** Test results: component tensile test No. Z01 (including DTI)



**Tabelle C.2.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z01 (mit DTI) – Anziehen**Table C.2.** Test results: component tensile test No. Z01 (including DTI) – tightening

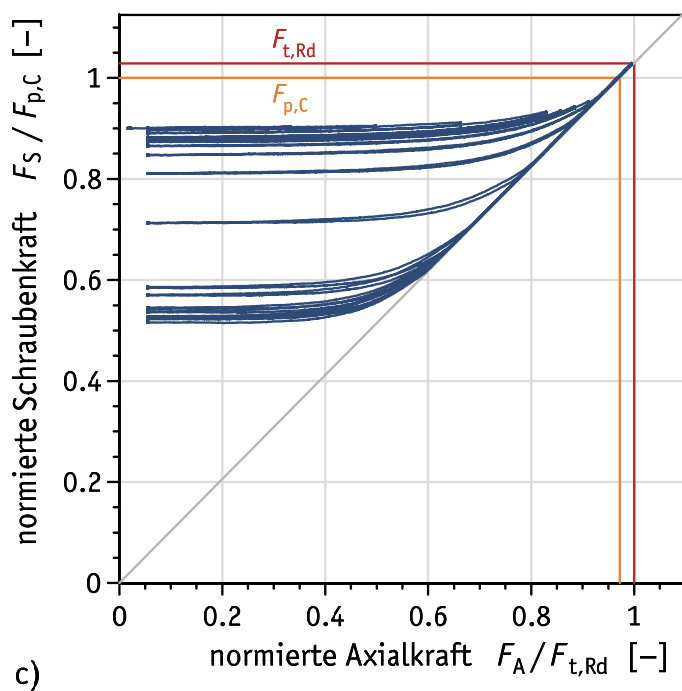
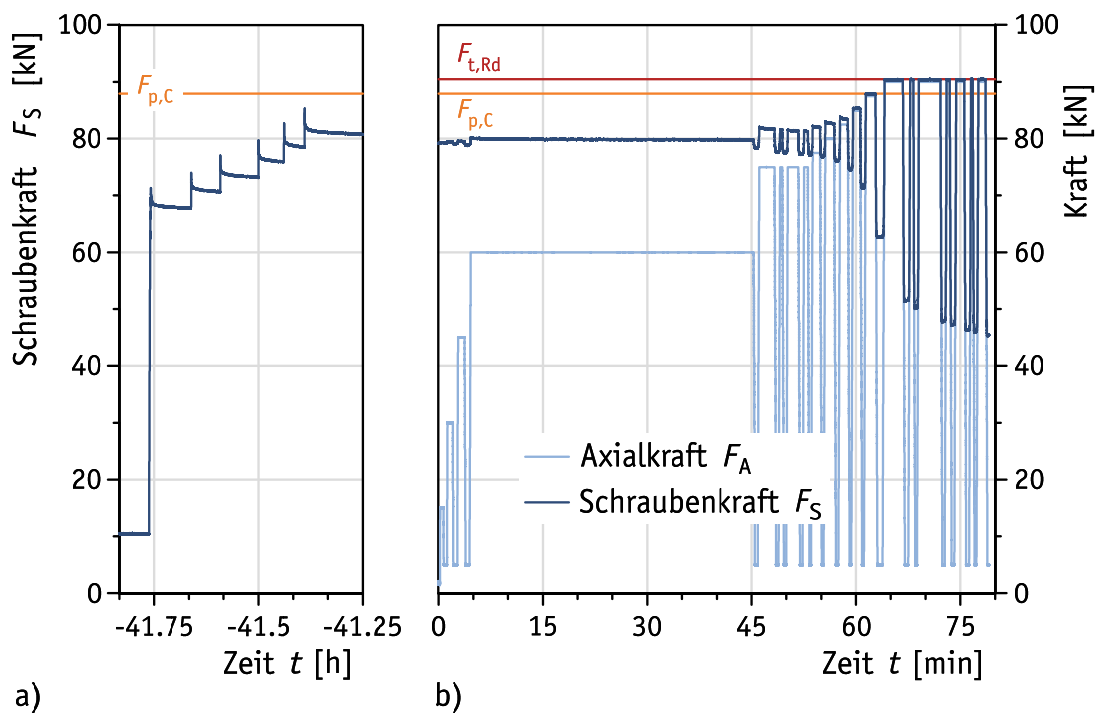
M16 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 10 – Z01							
$F_S$	[kN]		71	74	77	79	82
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,57	0,59	0,61	0,63	0,65
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,81	0,84	0,87	0,9	0,93
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,5	0,5	0,45	0,4	0,4
		2	0,5	0,45	0,45	0,4	0,35
		3	0,5	0,45	0,4	0,32	0,25
		4	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3
Fühllehre	[mm]	0,40					
$n_{refusal}$	[-]		0	0	0	2	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,53	0,49	0,45	0,39	0,34
$R / 2$	[mm]		±0,03	±0,05	±0,05	±0,07	±0,1

**Tabelle C.3.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z01 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.3.** Test results: component tensile test No. Z01 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]	=	[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 90 – 70 – Shr061 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 10 – Z01															
M	M			81,6			0,00	0,90	0,93	M			81,6	0,90	0,93
0	0		2,1	75,7			0,02	0,84	0,86	1	0,0	2,1	75,7	0,84	0,86
1	2	0,3	15,0	75,8	5,06		0,17	0,84	0,86	3	2,1	4,9	75,7	0,84	0,86
2	4	2,5	30,0	75,9	2,53		0,33	0,84	0,86	5	4,2	4,9	75,7	0,84	0,86
3	6	4,6	45,0	76,2	1,69		0,50	0,84	0,87	7	6,5	5,0	75,5	0,83	0,86
4	8	7,1	60,0	77,1	1,28		0,66	0,85	0,88	9	49,0	4,9	75,0	0,83	0,85
5	10	49,5	75,0	79,3	1,06		0,83	0,88	0,90	11	54,1	4,9	73,8	0,82	0,84
6	12	55,1	75,0	78,6	1,05		0,83	0,87	0,89	13	56,2	4,9	73,7	0,81	0,84
7	14	56,6	75,0	78,5	1,05		0,83	0,87	0,89	15	58,5	4,9	73,4	0,81	0,84
8	16	59,0	75,0	78,4	1,05		0,83	0,87	0,89	17	60,3	4,9	73,3	0,81	0,83
9	18	60,9	77,5	79,1	1,02		0,86	0,87	0,90	19	64,0	4,9	72,8	0,81	0,83
10	20	64,4	80,0	79,8	1,00		0,88	0,88	0,91	21	67,2	4,9	71,7	0,79	0,82
11	22	67,7	82,5	80,7	0,98		0,91	0,89	0,92	23	69,2	4,9	69,8	0,77	0,79
12	24	69,7	85,0	82,2	0,97	=	0,94	0,91	0,93	25	73,7	4,9	63,9	0,71	0,73
13	26	74,2	87,5	84,5	0,97	=	0,97	0,93	0,96	27	78,5	4,9	54,5	0,60	0,62
14	28	79,3	90,0	86,9	0,97	=	1,00	0,96	0,99	29	83,7	4,9	45,2	0,50	0,51
15	30	84,7	90,0	86,8	0,96	=	1,00	0,96	0,99	31	85,7	4,9	44,1	0,49	0,50
16	32	86,3	90,0	86,9	0,97	=	1,00	0,96	0,99	33	90,1	4,9	41,8	0,46	0,48
17	34	90,7	90,0	86,9	0,97	=	1,00	0,96	0,99	35	91,5	4,9	41,4	0,46	0,47
18	36	92,1	90,0	87,0	0,97	=	1,00	0,96	0,99	37	94,1	4,9	40,3	0,45	0,46
19	38	94,7	90,0	87,0	0,97	=	1,00	0,96	0,99	39	95,6	4,9	39,8	0,44	0,45
20	40	96,1	90,0	86,9	0,97	=	1,00	0,96	0,99	41	97,9	5,1	39,2	0,43	0,45









**M16 × 90 – 70 – Shr062 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 11 – Z02**

Shr.HV | Shb.HB | DTI.H8 | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.4.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z02 (mit DTI)

**Figure C.4.** Test results: component tensile test No. Z02 (including DTI)

**Tabelle C.4.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z02 (mit DTI) – Anziehen**Table C.4.** Test results: component tensile test No. Z02 (including DTI) – tightening

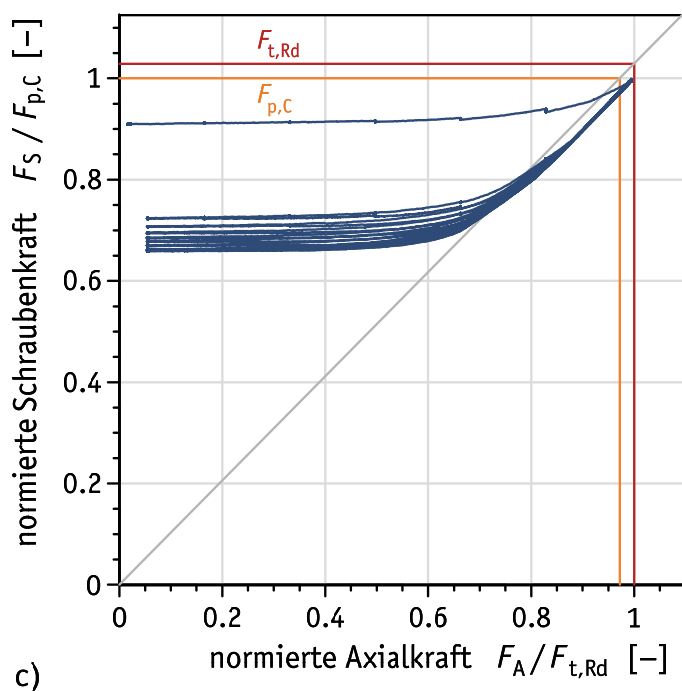
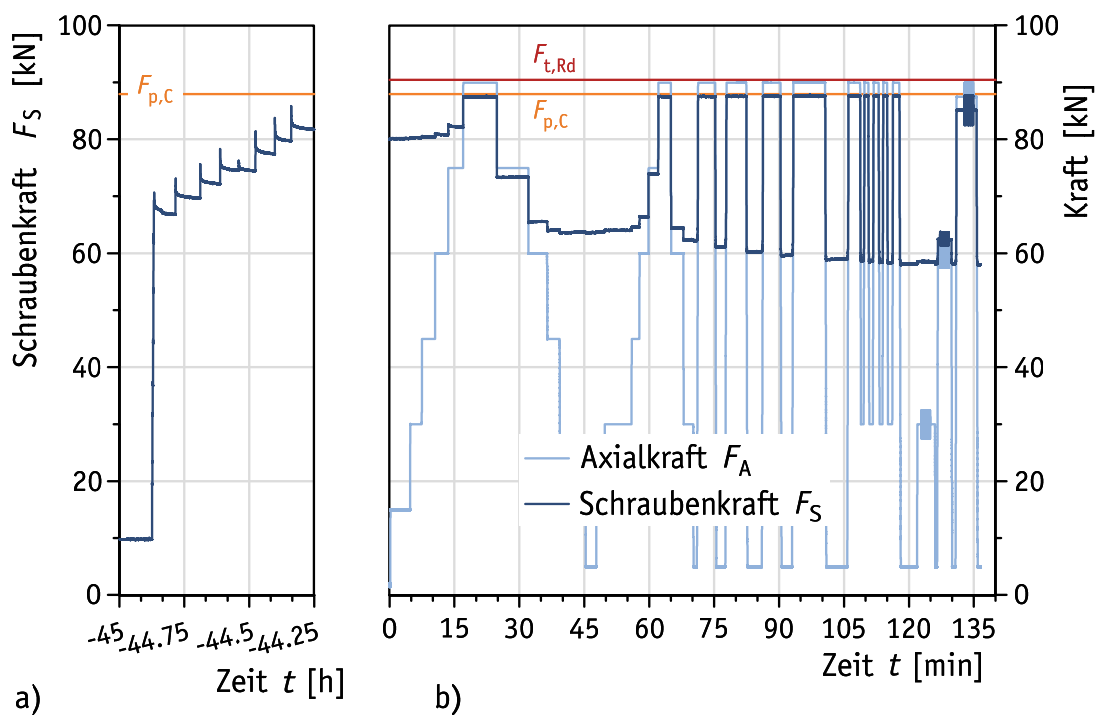
M16 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 11 – Z02								
$F_S$	[kN]		71	74	77	80	83	85
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,57	0,59	0,61	0,63	0,66	0,68
$F_S / F_{p,C}$	[-]		0,81	0,84	0,88	0,91	0,94	0,97
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,55	0,55	0,5	0,45	0,45	0,4
		2	0,55	0,5	0,45	0,45	0,4	0,35
		3	0,45	0,4	0,35	0,32	0,25	0,22
		4	0,55	0,5	0,5	0,45	0,4	0,35
Fühllehre	[mm]	0,40						
$n_{refusal}$	[-]		0	0	1	1	1	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,55	0,51	0,48	0,44	0,4	0,35
$R / 2$	[mm]		±0,08	±0,1	±0,1	±0,09	±0,13	±0,12

**Tabelle C.5.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z02 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.5.** Test results: component tensile test No. Z02 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]	=	[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 90 – 70 – Shr062 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 11 – Z02															
M	M			85,3			0,00	0,94	0,97	M			85,3	0,94	0,97
0	0		0,1	79,2			0,00	0,88	0,90	1	-0,2	0,1	79,2	0,88	0,90
1	2	0,3	15,0	79,2	5,29		0,17	0,88	0,90	3	1,0	4,9	79,2	0,88	0,90
2	4	1,3	30,0	79,5	2,65		0,33	0,88	0,90	5	2,4	4,9	79,1	0,87	0,90
3	6	2,8	45,0	79,7	1,77		0,50	0,88	0,91	7	4,2	4,9	78,8	0,87	0,90
4	8	4,6	59,9	80,2	1,34		0,66	0,89	0,91	9	45,7	4,9	78,3	0,87	0,89
5	10	46,1	75,0	82,0	1,09		0,83	0,91	0,93	11	48,7	5,0	77,6	0,86	0,88
6	12	49,1	75,0	81,6	1,09		0,83	0,90	0,93	13	49,8	4,9	77,4	0,86	0,88
7	14	50,2	75,0	81,5	1,09		0,83	0,90	0,93	15	52,1	4,9	77,2	0,85	0,88
8	16	52,6	75,0	81,3	1,09		0,83	0,90	0,93	17	53,4	4,9	77,2	0,85	0,88
9	18	53,8	77,5	82,2	1,06		0,86	0,91	0,93	19	55,2	4,9	76,7	0,85	0,87
10	20	55,6	80,0	83,0	1,04		0,88	0,92	0,94	21	57,2	4,9	76,1	0,84	0,87
11	22	57,7	82,5	83,8	1,02		0,91	0,93	0,95	23	59,1	4,9	74,5	0,82	0,85
12	24	59,6	85,0	85,4	1,00	=	0,94	0,94	0,97	25	61,0	4,9	71,3	0,79	0,81
13	26	61,4	87,5	87,8	1,00	=	0,97	0,97	1,00	27	63,4	4,9	62,8	0,69	0,71
14	28	64,1	90,0	90,3	1,00	=	0,99	1,00	1,03	29	67,2	4,9	51,4	0,57	0,59
15	30	67,8	90,0	90,4	1,01	=	1,00	1,00	1,03	31	68,6	4,9	50,2	0,55	0,57
16	32	69,1	90,0	90,4	1,00	=	0,99	1,00	1,03	33	72,6	4,9	47,9	0,53	0,54
17	34	73,0	90,0	90,4	1,00	=	0,99	1,00	1,03	35	73,9	4,9	47,3	0,52	0,54
18	36	74,4	90,0	90,3	1,00	=	0,99	1,00	1,03	37	76,1	4,9	46,4	0,51	0,53
19	38	76,6	90,0	90,4	1,00	=	0,99	1,00	1,03	39	77,1	4,9	46,0	0,51	0,52
20	40	77,6	90,0	90,4	1,00	=	1,00	1,00	1,03	41	79,1	4,9	45,4	0,50	0,52











**M16 × 100 – 80 – Shr018 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 12 – Z03**

Shr.HV | Shb.HB | DTI.H8 | 69 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.5.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z03 (mit DTI)

**Figure C.5.** Test results: component tensile test No. Z03 (including DTI)

**Tabelle C.6.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z03 (mit DTI) – Anziehen**Table C.6.** Test results: component tensile test No. Z03 (including DTI) – tightening

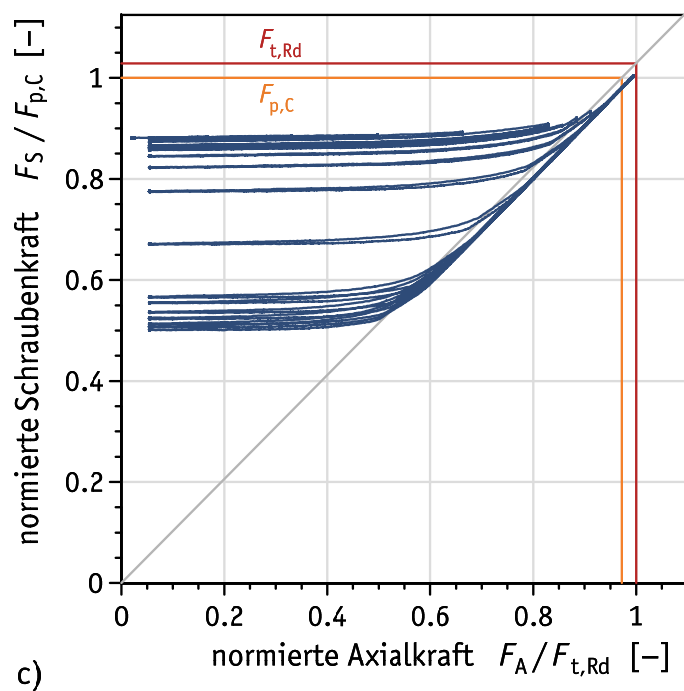
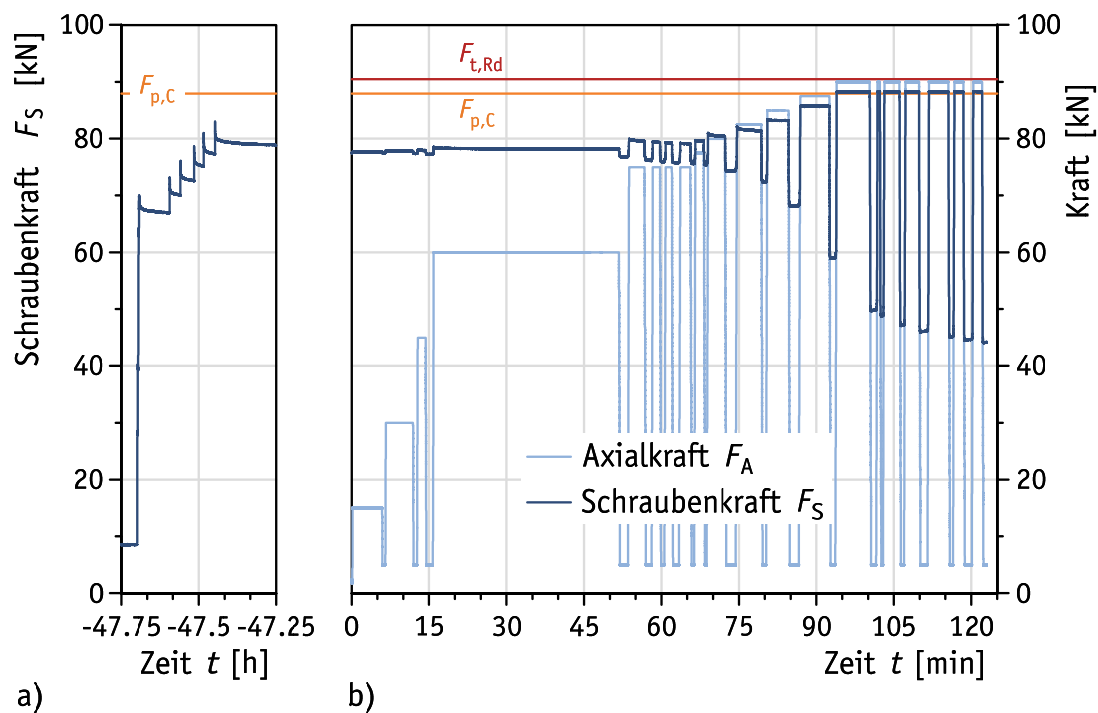
M16 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 12 – Z03										
$F_S$	[kN]		71	73	76	78	76	81	84	86
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,56	0,58	0,6	0,62	0,61	0,65	0,67	0,68
$F_S / F_{p,C}$	[-]		0,8	0,83	0,86	0,89	0,87	0,93	0,95	0,98
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,3	0,3	0,25	0,2	0,2	0,15	0,125	0,1
		2	0,6	0,55	0,5	0,5	0,5	0,45	0,4	0,4
		3	0,55	0,55	0,5	0,5	0,45	0,4	0,4	0,35
		4	0,45	0,4	0,4	0,35	0,3	0,3	0,25	0,25
Fühllehre	[mm]	0,40								
$n_{refusal}$	[-]		1	1	1	2	2	2	2	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,5	0,47	0,44	0,41	0,38	0,34	0,31	0,29
$R / 2$	[mm]		±0,18	±0,15	±0,15	±0,18	±0,18	±0,18	±0,16	±0,18

**Tabelle C.7.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z03 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.7.** Test results: component tensile test No. Z03 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 100 – 80 – Shr018 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 12 – Z03															
M	M			85,8			0,00	0,95	0,98	M			85,8	0,95	0,98
0	0		0,0	80,0			0,00	0,88	0,91	1	-0,3	0,0	80,0	0,88	0,91
1	2	17,0	89,9	87,5	0,97	=	0,99	0,97	0,99	3	46,6	4,9	63,6	0,70	0,72
2	4	62,1	89,9	87,5	0,97	=	0,99	0,97	1,00	5	70,6	4,9	62,2	0,69	0,71
3	6	71,3	89,9	87,6	0,97	=	0,99	0,97	1,00	7	76,6	4,9	61,1	0,68	0,69
4	8	77,9	89,9	87,5	0,97	=	0,99	0,97	1,00	9	84,4	4,9	60,3	0,67	0,69
5	10	86,3	90,0	87,5	0,97	=	0,99	0,97	1,00	11	91,9	4,9	59,7	0,66	0,68
6	12	93,3	90,0	87,6	0,97	=	0,99	0,97	1,00	13	103,1	4,9	58,9	0,65	0,67
7	14	106,1	89,9	87,6	0,97	=	0,99	0,97	1,00	15	109,3	30,0	58,7	0,65	0,67
8	16	109,8	90,0	87,5	0,97	=	0,99	0,97	1,00	17	111,3	30,0	58,6	0,65	0,67
9	18	111,9	90,0	87,6	0,97	=	0,99	0,97	1,00	19	113,4	30,0	58,4	0,65	0,66
10	20	114,1	90,0	87,6	0,97	=	0,99	0,97	1,00	21	115,7	30,0	58,4	0,65	0,66
11	22	116,4	90,0	87,6	0,97	=	0,99	0,97	1,00	23	119,9	4,9	58,1	0,64	0,66
12	24	124,0	32,5	58,6	1,81		0,36	0,65	0,67	25	126,3	4,9	58,1	0,64	0,66
13	26	128,3	62,4	63,7	1,02		0,69	0,70	0,72	27	130,4	4,9	58,2	0,64	0,66
14	28	133,9	89,9	87,6	0,97	=	0,99	0,97	1,00	29	136,6	4,9	58,0	0,64	0,66









**M16 × 100 – 80 – Shr018 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 13 – Z04**

Shr.HV | Shb.HB | DTI.H8 | 69 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.6.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z04 (mit DTI)

**Figure C.6.** Test results: component tensile test No. Z04 (including DTI)

**Tabelle C.8.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z04 (mit DTI) – Anziehen**Table C.8.** Test results: component tensile test No. Z04 (including DTI) – tightening

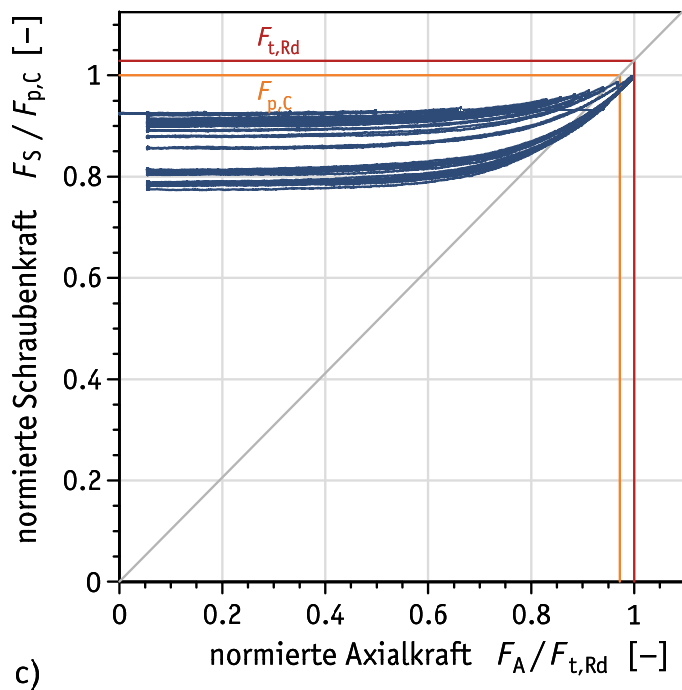
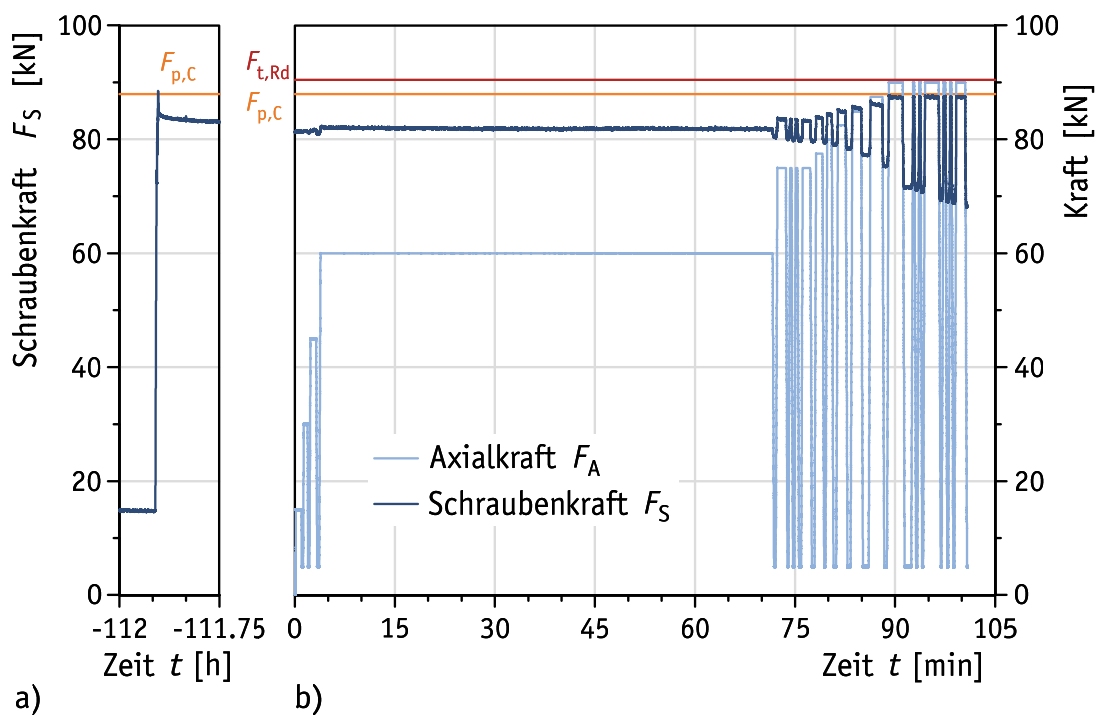
M16 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 13 – Z04								
$F_S$	[kN]		70	73	76	79	81	83
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,56	0,58	0,61	0,63	0,64	0,66
$F_S / F_{p,C}$	[-]		0,8	0,83	0,87	0,89	0,92	0,94
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,55	0,5	0,5	0,4	0,4	0,32
		2	0,4	0,35	0,28	0,25	0,2	0,125
		3	0,35	0,3	0,3	0,25	0,25	0,2
		4	0,7	0,6	0,6	0,6	0,55	0,5
Fühllehre	[mm]	0,40						
$n_{refusal}$	[-]		1	2	2	2	2	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,53	0,46	0,44	0,4	0,37	0,3
$R / 2$	[mm]		±0,2	±0,18	±0,19	±0,2	±0,2	±0,21

**Tabelle C.9.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z04 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.9.** Test results: component tensile test No. Z04 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]	=	[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 100 – 80 – Shr018 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 13 – Z04															
M	M			82,9			0,00	0,92	0,94	M			82,9	0,92	0,94
0	0		0,0	77,4			0,00	0,86	0,88	1	-0,2	0,0	77,4	0,86	0,88
1	2	0,2	15,0	77,7	5,18		0,17	0,86	0,88	3	6,3	4,9	77,5	0,86	0,88
2	4	6,6	30,0	77,8	2,60		0,33	0,86	0,89	5	12,3	4,9	77,4	0,86	0,88
3	6	12,8	45,0	78,0	1,73		0,50	0,86	0,89	7	15,1	4,9	77,3	0,85	0,88
4	8	15,9	60,0	78,5	1,31		0,66	0,87	0,89	9	52,8	4,9	76,8	0,85	0,87
5	10	53,7	75,0	79,9	1,07		0,83	0,88	0,91	11	57,6	4,9	76,2	0,84	0,87
6	12	58,3	75,0	79,5	1,06		0,83	0,88	0,90	13	60,2	4,9	75,9	0,84	0,86
7	14	60,8	75,0	79,3	1,06		0,83	0,88	0,90	15	62,8	4,9	75,7	0,84	0,86
8	16	63,6	75,0	79,2	1,06		0,83	0,88	0,90	17	66,2	4,9	75,6	0,84	0,86
9	18	66,6	77,5	79,7	1,03		0,86	0,88	0,91	19	68,6	4,9	75,4	0,83	0,86
10	20	69,0	80,0	81,0	1,01		0,88	0,90	0,92	21	73,5	4,9	74,3	0,82	0,85
11	22	74,6	82,5	82,1	1,00	=	0,91	0,91	0,93	23	79,9	4,9	72,3	0,80	0,82
12	24	80,5	85,0	83,3	0,98	=	0,94	0,92	0,95	25	85,8	4,9	68,1	0,75	0,78
13	26	86,9	87,5	85,7	0,98	=	0,97	0,95	0,97	27	93,2	4,9	59,0	0,65	0,67
14	28	94,0	90,0	88,2	0,98	=	0,99	0,98	1,00	29	101,1	4,9	49,8	0,55	0,57
15	30	101,9	90,0	88,3	0,98	=	0,99	0,98	1,00	31	102,7	4,9	48,8	0,54	0,56
16	32	103,2	90,0	88,2	0,98	=	0,99	0,98	1,00	33	106,7	4,9	47,2	0,52	0,54
17	34	107,3	90,0	88,2	0,98	=	0,99	0,98	1,00	35	110,8	4,9	46,1	0,51	0,52
18	36	111,8	90,0	88,2	0,98	=	0,99	0,98	1,00	37	116,1	4,9	45,1	0,50	0,51
19	38	116,7	90,0	88,3	0,98	=	0,99	0,98	1,00	39	119,5	4,9	44,6	0,49	0,51
20	40	120,4	90,0	88,3	0,98	=	0,99	0,98	1,00	41	123,0	4,9	44,1	0,49	0,50

**M16 × 90 – 70 – Shr061 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 14 – Z05**

Shr.HV | Shb.HB | DTI.H8 | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.7.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z05 (mit DTI)

**Figure C.7.** Test results: component tensile test No. Z05 (including DTI)



**Tabelle C.10.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z05 (mit DTI) – Anziehen**Table C.10.** Test results: component tensile test No. Z05 (including DTI) – tightening

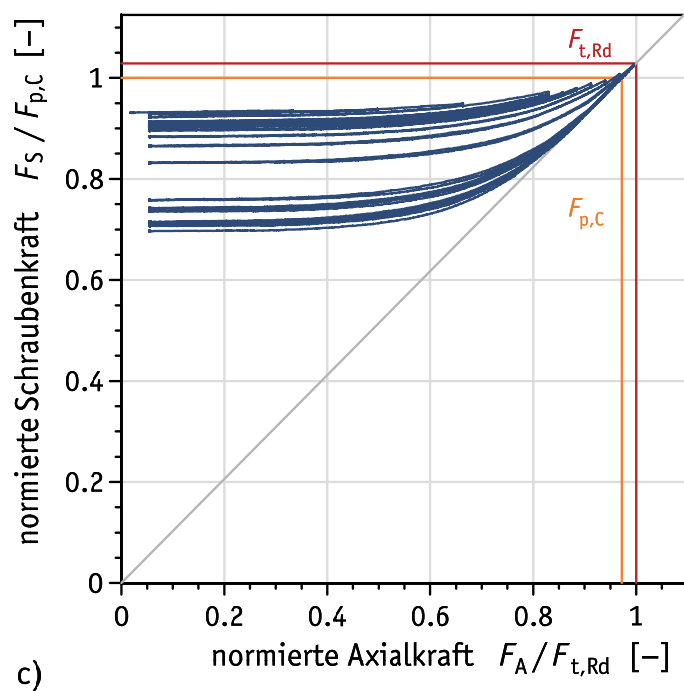
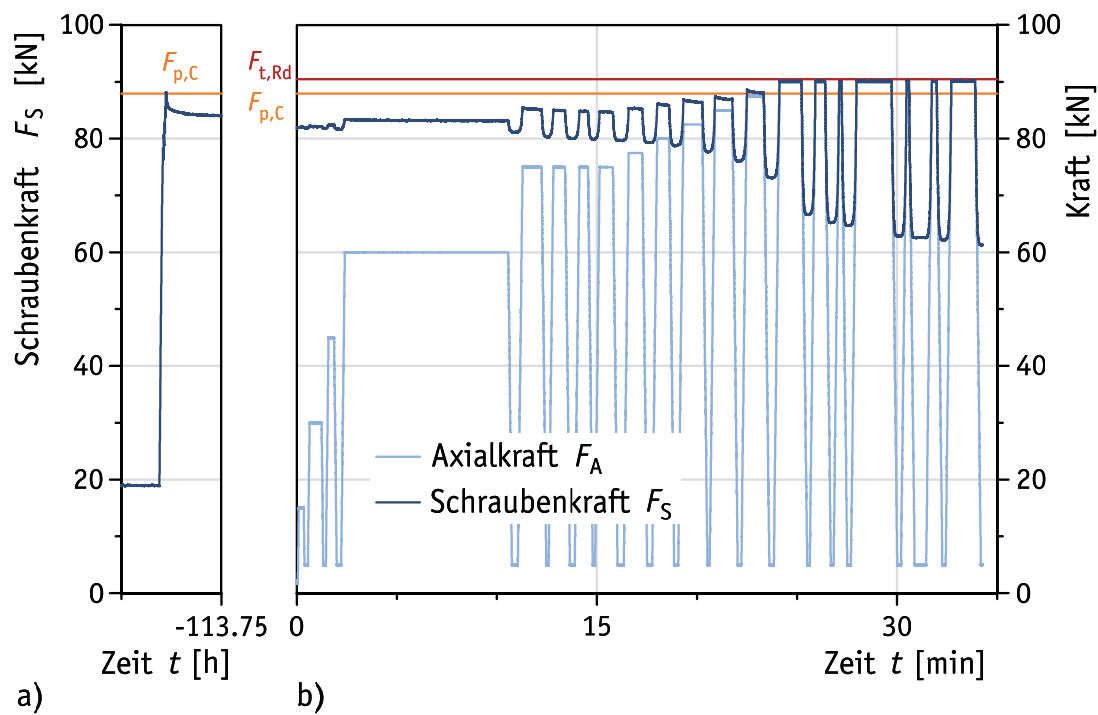
M16 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 14 – Z05			
$F_S$	[kN]		88
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,7
$F_S / F_{p,C}$	[-]		1,01
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,35
		2	0,25
		3	0,22
		4	0,25
Fühllehre	[mm]	0,40	—
$n_{refusal}$	[-]		4
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,29
$R/2$	[mm]		±0,09

**Tabelle C.11.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z05 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.11.** Test results: component tensile test No. Z05 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 90 – 70 – Shr061 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 14 – Z05															
M	M			88,5			0,00	0,98	1,01	M			88,5	0,98	1,01
0	0		0,0	81,2			0,00	0,90	0,92	1	-0,1	0,0	81,2	0,90	0,92
1	2	0,2	15,0	81,4	5,41		0,17	0,90	0,93	3	1,1	4,9	81,4	0,90	0,93
2	4	1,3	29,9	81,4	2,72		0,33	0,90	0,93	5	2,1	4,9	81,2	0,90	0,92
3	6	2,4	45,1	81,5	1,81		0,50	0,90	0,93	7	3,5	4,9	80,9	0,90	0,92
4	8	3,9	60,0	82,2	1,37		0,66	0,91	0,93	9	72,0	4,9	80,4	0,89	0,91
5	10	72,4	75,0	83,8	1,12		0,83	0,93	0,95	11	73,9	4,9	80,0	0,88	0,91
6	12	74,3	75,0	83,4	1,11		0,83	0,92	0,95	13	74,8	4,9	80,0	0,88	0,91
7	14	75,1	75,0	83,5	1,11		0,83	0,92	0,95	15	75,7	4,9	79,8	0,88	0,91
8	16	76,2	75,0	83,3	1,11		0,83	0,92	0,95	17	77,7	4,9	79,6	0,88	0,91
9	18	78,2	77,5	84,0	1,08		0,86	0,93	0,96	19	79,4	4,9	79,5	0,88	0,90
10	20	79,8	80,0	84,5	1,06		0,88	0,93	0,96	21	81,0	4,9	79,0	0,87	0,90
11	22	81,4	82,5	85,2	1,03		0,91	0,94	0,97	23	83,1	4,9	78,3	0,87	0,89
12	24	83,6	85,0	85,8	1,01		0,94	0,95	0,98	25	85,7	4,9	77,2	0,85	0,88
13	26	86,3	87,5	86,7	0,99	=	0,97	0,96	0,99	27	88,6	4,9	75,4	0,83	0,86
14	28	89,1	90,0	87,7	0,97	=	0,99	0,97	1,00	29	91,9	4,9	71,6	0,79	0,81
15	30	92,7	90,0	87,3	0,97	=	1,00	0,97	0,99	31	93,2	4,9	71,1	0,79	0,81
16	32	93,6	90,0	87,4	0,97	=	0,99	0,97	0,99	33	94,1	4,9	70,7	0,78	0,80
17	34	94,5	90,0	87,6	0,97	=	0,99	0,97	1,00	35	96,8	4,9	69,4	0,77	0,79
18	36	97,3	90,0	87,4	0,97	=	0,99	0,97	0,99	37	97,9	4,9	69,0	0,76	0,79
19	38	98,3	90,0	87,3	0,97	=	0,99	0,97	0,99	39	98,8	4,9	68,7	0,76	0,78
20	40	99,2	90,0	87,2	0,97	=	0,99	0,96	0,99	41	100,9	4,9	68,1	0,75	0,78

**M16 × 90 – 70 – Shr062 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 15 – Z06**

Shr.HV | Shb.HB | DTI.H8 | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.8.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z06 (mit DTI)

**Figure C.8.** Test results: component tensile test No. Z06 (including DTI)

**Tabelle C.12.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z06 (mit DTI) – Anziehen**Table C.12.** Test results: component tensile test No. Z06 (including DTI) – tightening

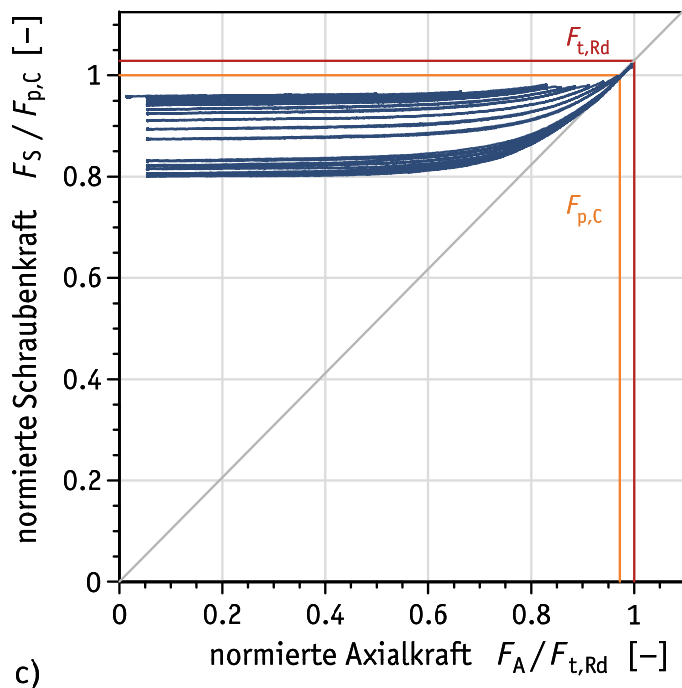
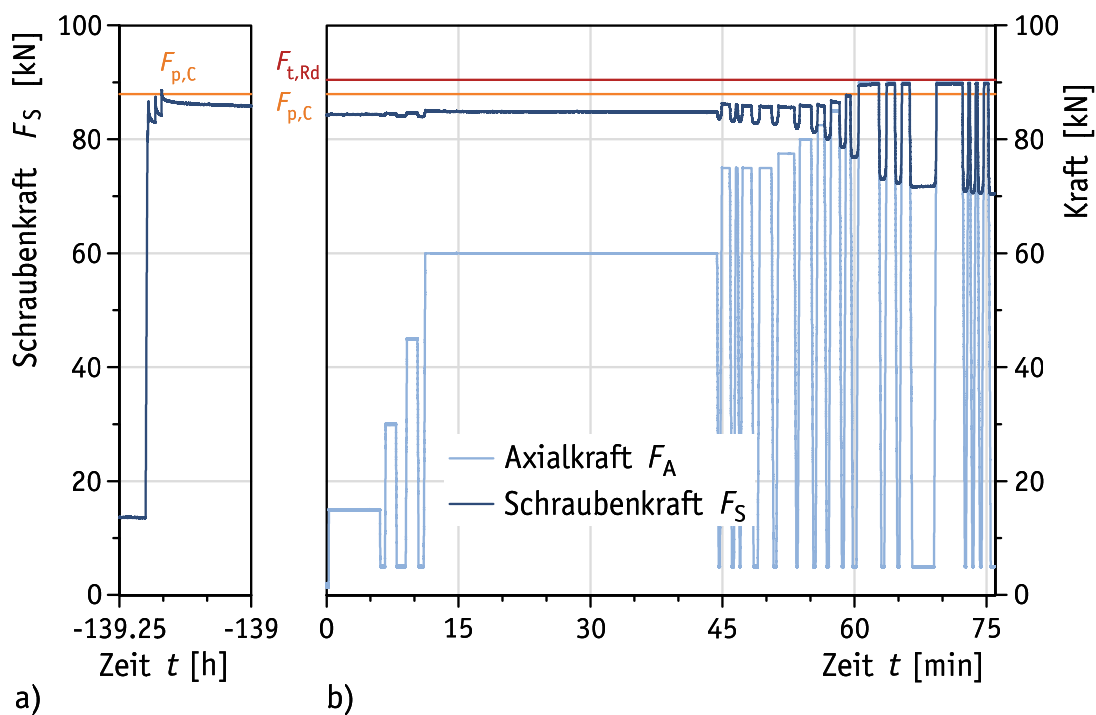
M16 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 15 – Z06			
$F_S$	[kN]		88
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,7
$F_S / F_{p,C}$	[-]		1,0
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,35
		2	0,32
		3	0,2
		4	0,25
Fühllehre	[mm]	0,40	
$n_{refusal}$	[-]		4
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,3
$R/2$	[mm]		±0,1

**Tabelle C.13.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z06 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.13.** Test results: component tensile test No. Z06 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 90 – 70 – Shr062 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 15 – Z06															
M	M			88,2			0,00	0,98	1,00	M			88,2	0,98	1,00
0	0		0,0	81,9			0,00	0,91	0,93	1	-0,2	0,0	81,9	0,91	0,93
1	2	0,1	15,0	82,0	5,47		0,17	0,91	0,93	3	0,5	5,1	81,9	0,91	0,93
2	4	0,6	29,9	82,2	2,75		0,33	0,91	0,93	5	1,4	5,1	81,8	0,90	0,93
3	6	1,6	44,9	82,4	1,84		0,50	0,91	0,94	7	2,1	5,1	81,6	0,90	0,93
4	8	2,4	60,0	83,4	1,39		0,66	0,92	0,95	9	10,9	5,1	81,1	0,90	0,92
5	10	11,3	75,0	85,5	1,14		0,83	0,94	0,97	11	12,5	5,1	80,3	0,89	0,91
6	12	12,8	75,0	85,0	1,13		0,83	0,94	0,97	13	13,8	5,1	80,0	0,88	0,91
7	14	14,1	75,0	84,8	1,13		0,83	0,94	0,96	15	14,8	5,1	79,9	0,88	0,91
8	16	15,1	75,0	84,7	1,13		0,83	0,94	0,96	17	16,2	5,1	79,7	0,88	0,91
9	18	16,6	77,5	85,3	1,10		0,86	0,94	0,97	19	17,6	5,1	79,3	0,88	0,90
10	20	18,0	80,0	86,1	1,08		0,88	0,95	0,98	21	19,0	5,1	78,7	0,87	0,90
11	22	19,3	82,5	86,9	1,05		0,91	0,96	0,99	23	20,6	5,1	77,7	0,86	0,88
12	24	20,9	85,0	87,4	1,03		0,94	0,97	0,99	25	22,1	5,1	76,1	0,84	0,87
13	26	22,5	87,5	88,6	1,01		0,97	0,98	1,01	27	23,7	5,1	73,2	0,81	0,83
14	28	24,1	90,0	90,1	1,00	=	1,00	1,00	1,03	29	25,5	5,1	66,6	0,74	0,76
15	30	25,9	90,0	90,2	1,00	=	1,00	1,00	1,03	31	26,7	5,1	65,3	0,72	0,74
16	32	27,1	90,0	90,1	1,00	=	0,99	1,00	1,02	33	27,6	5,1	64,7	0,72	0,74
17	34	28,0	90,0	90,1	1,00	=	0,99	1,00	1,03	35	30,1	4,9	62,9	0,70	0,72
18	36	30,5	90,0	90,1	1,00	=	1,00	1,00	1,03	37	31,2	4,9	62,5	0,69	0,71
19	38	31,7	90,0	90,2	1,00	=	0,99	1,00	1,03	39	32,3	4,9	62,2	0,69	0,71
20	40	32,7	90,0	90,1	1,00	=	0,99	1,00	1,02	41	34,3	4,9	61,3	0,68	0,70


**M16 × 100 – 80 – Shr018 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 16 – Z07**

Shr.HV | Shb.HB | DTI.H8 | 69 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.9.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z07 (mit DTI)

**Figure C.9.** Test results: component tensile test No. Z07 (including DTI)

**Tabelle C.14.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z07 (mit DTI) – Anziehen**Table C.14.** Test results: component tensile test No. Z07 (including DTI) – tightening

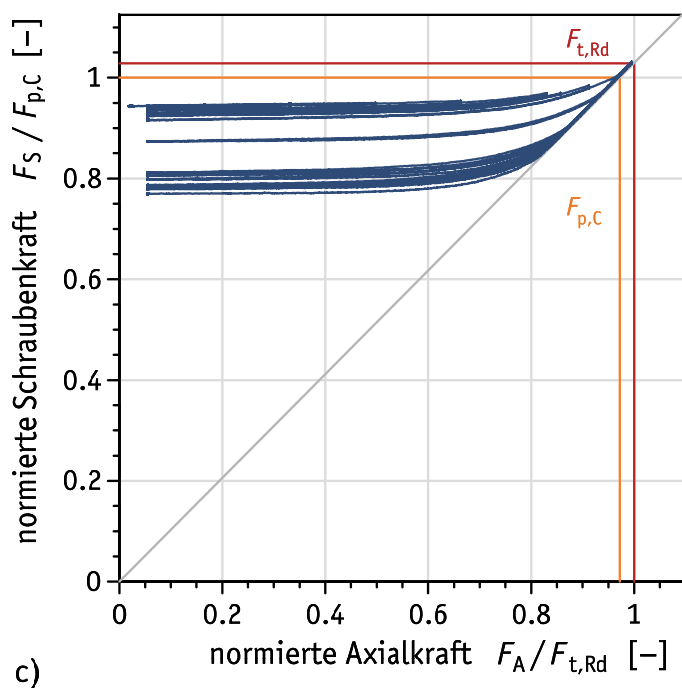
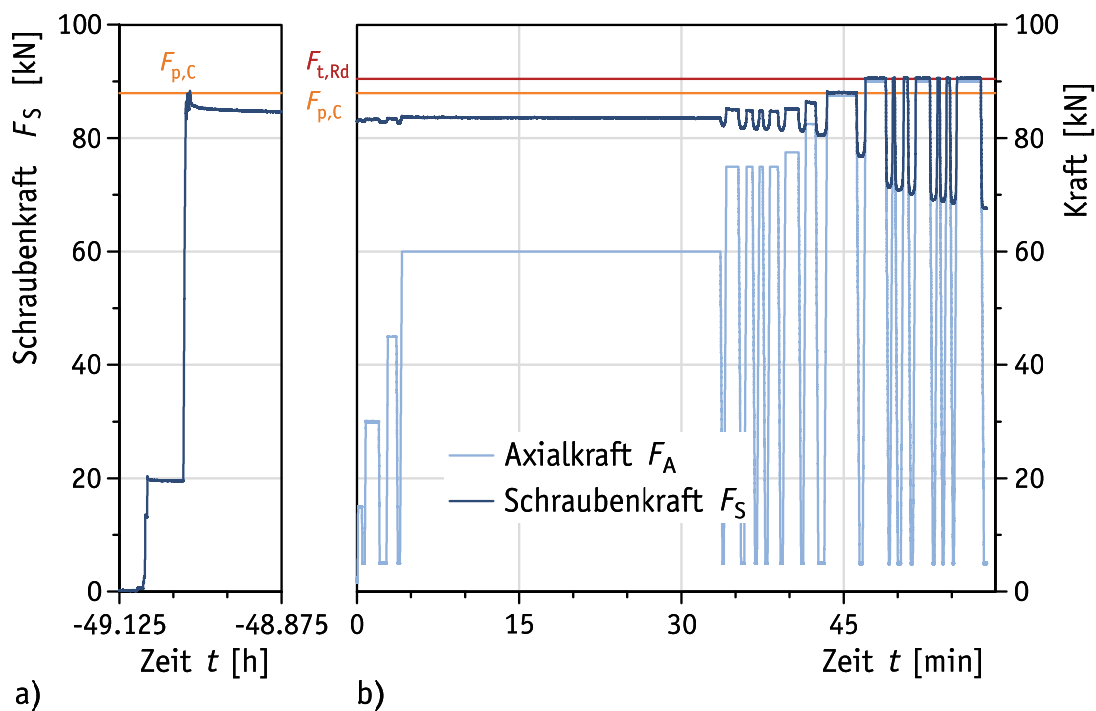
M16 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 16 – Z07			
$F_S$	[kN]		91
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,72
$F_S / F_{p,C}$	[-]		1,03
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,15
		2	0,28
		3	0,15
		4	0,125
Fühllehre	[mm]	0,40	
$n_{refusal}$	[-]		4
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,19
$R/2$	[mm]		±0,09

**Tabelle C.15.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z07 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.15.** Test results: component tensile test No. Z07 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 100 – 80 – Shr018 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 16 – Z07															
M	M			90,6			0,00	1,00	1,03	M			90,6	1,00	1,03
0	0		0,0	84,2			0,00	0,93	0,96	1	-0,6	0,0	84,2	0,93	0,96
1	2	0,3	15,1	84,4	5,60		0,17	0,93	0,96	3	6,3	4,9	84,2	0,93	0,96
2	4	6,7	30,0	84,6	2,82		0,33	0,94	0,96	5	8,5	4,9	84,1	0,93	0,96
3	6	9,1	45,1	84,7	1,88		0,50	0,94	0,96	7	10,8	4,9	84,0	0,93	0,96
4	8	11,2	60,0	85,0	1,42		0,66	0,94	0,97	9	44,6	4,9	83,6	0,92	0,95
5	10	44,9	75,0	86,3	1,15		0,83	0,95	0,98	11	46,2	4,9	83,2	0,92	0,95
6	12	46,5	75,0	86,0	1,15		0,83	0,95	0,98	13	47,0	4,9	83,1	0,92	0,95
7	14	47,3	75,0	85,9	1,15		0,83	0,95	0,98	15	48,8	4,9	82,9	0,92	0,94
8	16	49,2	75,0	85,8	1,14		0,83	0,95	0,98	17	51,0	4,9	82,7	0,91	0,94
9	18	51,4	77,5	85,8	1,11		0,86	0,95	0,98	19	53,4	4,9	81,9	0,91	0,93
10	20	53,8	80,0	86,0	1,08		0,88	0,95	0,98	21	55,4	4,9	81,2	0,90	0,92
11	22	55,8	82,5	86,2	1,05		0,91	0,95	0,98	23	56,9	4,9	80,0	0,89	0,91
12	24	57,3	85,0	86,8	1,02		0,94	0,96	0,99	25	58,7	4,9	78,6	0,87	0,89
13	26	59,1	87,5	87,8	1,00		0,97	0,97	1,00	27	60,0	4,9	76,9	0,85	0,87
14	28	60,5	90,0	89,4	0,99	=	0,99	0,99	1,02	29	63,2	4,9	73,1	0,81	0,83
15	30	63,7	90,0	89,6	1,00	=	0,99	0,99	1,02	31	65,0	4,9	72,3	0,80	0,82
16	32	65,4	90,0	89,6	1,00	=	0,99	0,99	1,02	33	67,9	4,9	71,7	0,79	0,82
17	34	69,3	90,0	89,7	1,00	=	0,99	0,99	1,02	35	72,6	4,9	70,8	0,78	0,81
18	36	72,9	90,0	89,7	1,00	=	0,99	0,99	1,02	37	73,4	4,9	70,6	0,78	0,80
19	38	73,8	90,0	89,7	1,00	=	0,99	0,99	1,02	39	74,3	4,9	70,5	0,78	0,80
20	40	74,7	90,0	89,7	1,00	=	0,99	0,99	1,02	41	75,9	4,9	70,4	0,78	0,80


**M16 × 100 – 80 – Shr018 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 22 – Z08**

Shr.HV | Shb.HB | DTI.H8 | 69 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.10.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z08 (mit DTI)

**Figure C.10.** Test results: component tensile test No. Z08 (including DTI)

**Tabelle C.16.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z08 (mit DTI) – Anziehen**Table C.16.** Test results: component tensile test No. Z08 (including DTI) – tightening

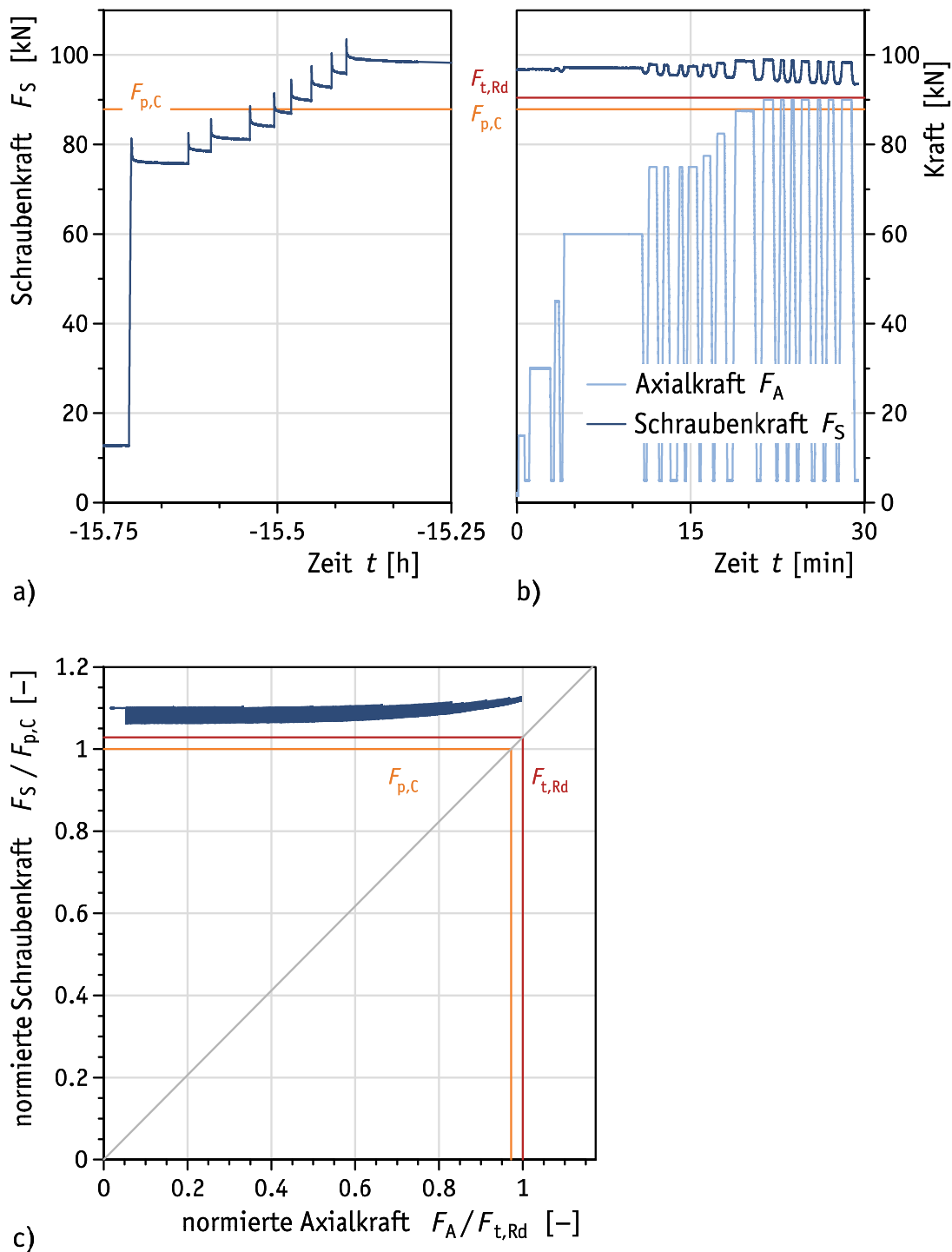
M16 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 22 – Z08			
$F_S$	[kN]		88
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,7
$F_S / F_{p,C}$	[-]		1,0
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,22
		2	0,125
		3	0,3
		4	0,25
Fühllehre	[mm]	0,40	
$n_{refusal}$	[-]		4
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,24
$R/2$	[mm]		±0,1

**Tabelle C.17.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z08 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.17.** Test results: component tensile test No. Z08 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 100 – 80 – Shr018 – H8 – AND-A1 – Shr.fix – 22 – Z08															
M	M			88,3			0,00	0,98	1,00	M			88,3	0,98	1,00
0	0		0,0	82,9			0,00	0,92	0,94	1	-0,3	0,0	82,9	0,92	0,94
1	2	0,1	15,1	83,1	5,51		0,17	0,92	0,95	3	0,6	4,9	83,0	0,92	0,94
2	4	0,8	30,0	83,3	2,78		0,33	0,92	0,95	5	2,4	4,9	82,9	0,92	0,94
3	6	2,9	44,9	83,5	1,86		0,50	0,92	0,95	7	3,9	4,9	82,7	0,91	0,94
4	8	4,2	60,0	83,9	1,40		0,66	0,93	0,95	9	33,9	4,9	82,2	0,91	0,94
5	10	34,2	75,0	85,2	1,14		0,83	0,94	0,97	11	35,7	4,9	81,7	0,90	0,93
6	12	36,0	75,0	84,9	1,13		0,83	0,94	0,97	13	36,9	4,9	81,7	0,90	0,93
7	14	37,2	75,0	84,7	1,13		0,83	0,94	0,96	15	37,8	4,9	81,6	0,90	0,93
8	16	38,2	75,0	84,7	1,13		0,83	0,94	0,96	17	39,2	4,9	81,4	0,90	0,93
9	18	39,6	77,5	85,2	1,10		0,86	0,94	0,97	19	41,2	4,9	81,3	0,90	0,92
10	20	41,5	82,5	86,5	1,05		0,91	0,96	0,98	21	42,9	4,9	80,6	0,89	0,92
11	22	43,5	87,5	88,2	1,01	=	0,97	0,98	1,00	23	46,6	4,9	76,8	0,85	0,87
12	24	47,0	90,0	90,5	1,01	=	0,99	1,00	1,03	25	49,2	4,9	71,3	0,79	0,81
13	26	49,6	90,0	90,5	1,01	=	0,99	1,00	1,03	27	50,2	4,9	70,9	0,78	0,81
14	28	50,6	90,0	90,6	1,01	=	0,99	1,00	1,03	29	51,3	4,9	70,2	0,78	0,80
15	30	51,7	90,0	90,5	1,01	=	0,99	1,00	1,03	31	53,3	4,9	69,1	0,76	0,79
16	32	53,7	90,0	90,6	1,01	=	0,99	1,00	1,03	33	54,2	4,9	68,8	0,76	0,78
17	34	54,5	90,0	90,5	1,01	=	0,99	1,00	1,03	35	55,2	4,9	68,5	0,76	0,78
18	36	55,5	90,0	90,6	1,01	=	0,99	1,00	1,03	37	58,2	4,9	67,6	0,75	0,77

**M16 × 90 – 70 – Shr061 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 23 – Z09**












Shr.HV | Shb.H | 59.5 | DTI.H8 | Shb.HN | Mu.HV.rot


**Bild C.11.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z09 (mit DTI)

**Figure C.11.** Test results: component tensile test No. Z09 (including DTI)



**Tabelle C.18.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z09 (mit DTI) – Anziehen**Table C.18.** Test results: component tensile test No. Z09 (including DTI) – tightening

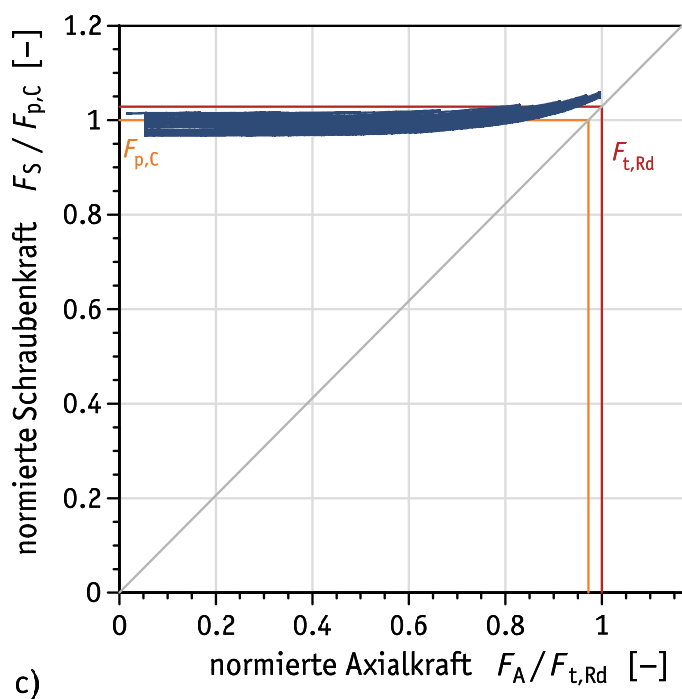
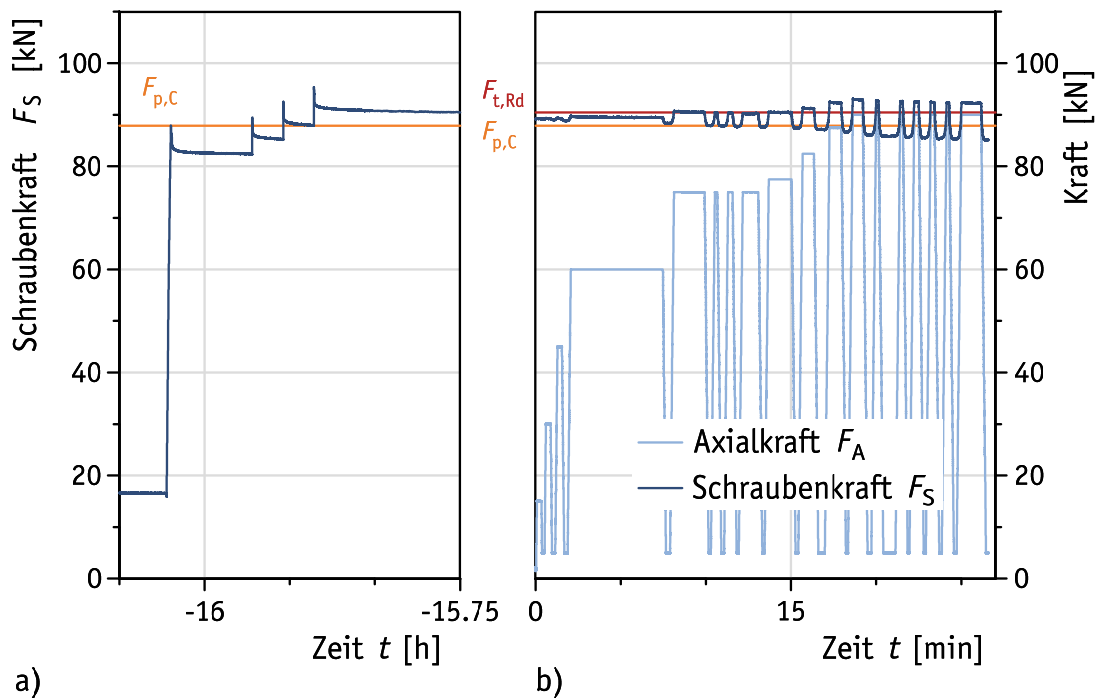
M16 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 23 – Z09											
$F_S$	[kN]		81	83	86	89	91	94	98	100	103
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,65	0,66	0,68	0,71	0,73	0,75	0,78	0,8	0,82
$F_S / F_{p,C}$	[-]		0,92	0,94	0,97	1,01	1,04	1,07	1,11	1,14	1,18
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,4	0,35	0,32	0,28	0,25	0,2	0,125	0,1	0,05
		2	0,55	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35	0,32	0,28	0,25
		3	0,45	0,4	0,35	0,35	0,32	0,32	0,28	0,25	0,22
		4	0,32	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0	0
Fühllehre	[mm]	0,25									
$n_{refusal}$	[-]		0	0	0	1	1	2	2	2	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,45	0,42	0,38	0,34	0,3	0,26	0,2	0,17	0,14
$R / 2$	[mm]		±0,14	±0,15	±0,15	±0,15	±0,15	±0,15	±0,15	±0,15	±0,14

**Tabelle C.19.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z09 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.19.** Test results: component tensile test No. Z09 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 90 – 70 – Shr061 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 23 – Z09															
M	M			103,4			0,00	1,14	1,18	M			103,4	1,14	1,18
0	0		0,1	96,7			0,00	1,07	1,10	1	-0,1	0,1	96,7	1,07	1,10
1	2	0,2	15,0	96,8	6,44		0,17	1,07	1,10	3	0,9	5,0	96,7	1,07	1,10
2	4	1,1	29,9	96,9	3,24		0,33	1,07	1,10	5	3,1	4,9	96,5	1,07	1,10
3	6	3,3	45,0	96,9	2,15		0,50	1,07	1,10	7	3,8	4,9	96,4	1,07	1,10
4	8	4,1	60,0	97,3	1,62		0,66	1,08	1,11	9	11,1	4,9	96,0	1,06	1,09
5	10	11,4	75,0	97,9	1,31		0,83	1,08	1,11	11	12,4	4,9	95,6	1,06	1,09
6	12	12,7	75,0	97,7	1,30		0,83	1,08	1,11	13	13,6	4,9	95,5	1,06	1,09
7	14	14,1	75,0	97,6	1,30		0,83	1,08	1,11	15	14,6	4,9	95,3	1,05	1,08
8	16	14,8	75,0	97,5	1,30		0,83	1,08	1,11	17	15,8	4,9	95,3	1,05	1,08
9	18	16,1	77,5	97,7	1,26		0,86	1,08	1,11	19	17,0	4,9	95,2	1,05	1,08
10	20	17,3	82,5	98,2	1,19		0,91	1,09	1,12	21	18,4	4,9	95,0	1,05	1,08
11	22	18,9	87,5	98,8	1,13		0,97	1,09	1,12	23	20,9	4,9	94,5	1,05	1,07
12	24	21,3	90,0	99,0	1,10		0,99	1,10	1,13	25	22,4	4,9	94,2	1,04	1,07
13	26	22,8	90,0	98,8	1,10		0,99	1,09	1,12	27	23,4	4,9	94,0	1,04	1,07
14	28	23,7	90,0	98,7	1,10		0,99	1,09	1,12	29	24,3	4,9	94,0	1,04	1,07
15	30	24,6	90,0	98,6	1,10		0,99	1,09	1,12	31	25,6	4,9	93,8	1,04	1,07
16	32	26,0	90,0	98,5	1,09		0,99	1,09	1,12	33	26,6	4,9	93,7	1,04	1,07
17	34	26,9	90,0	98,5	1,09		0,99	1,09	1,12	35	27,7	4,9	93,6	1,03	1,06
18	36	28,1	90,0	98,3	1,09		0,99	1,09	1,12	37	29,4	4,9	93,6	1,03	1,06







**M16 × 90 – 70 – Shr062 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 24 – Z10**

Shr.HV | Shb.H | 59.5 | DTI.H8 | Shb.HN | Mu.HV.rot


**Bild C.12.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z10 (mit DTI)

**Figure C.12.** Test results: component tensile test No. Z10 (including DTI)

**Tabelle C.20.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z10 (mit DTI) – Anziehen**Table C.20.** Test results: component tensile test No. Z10 (including DTI) – tightening

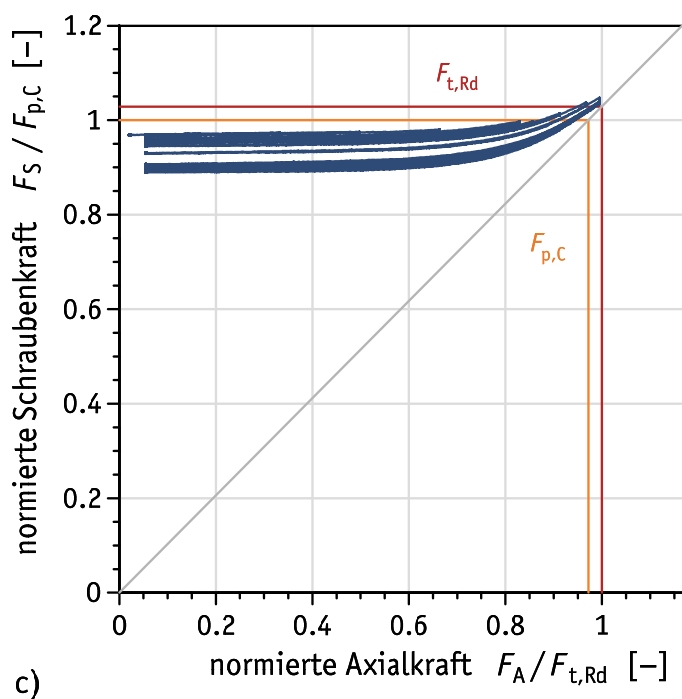
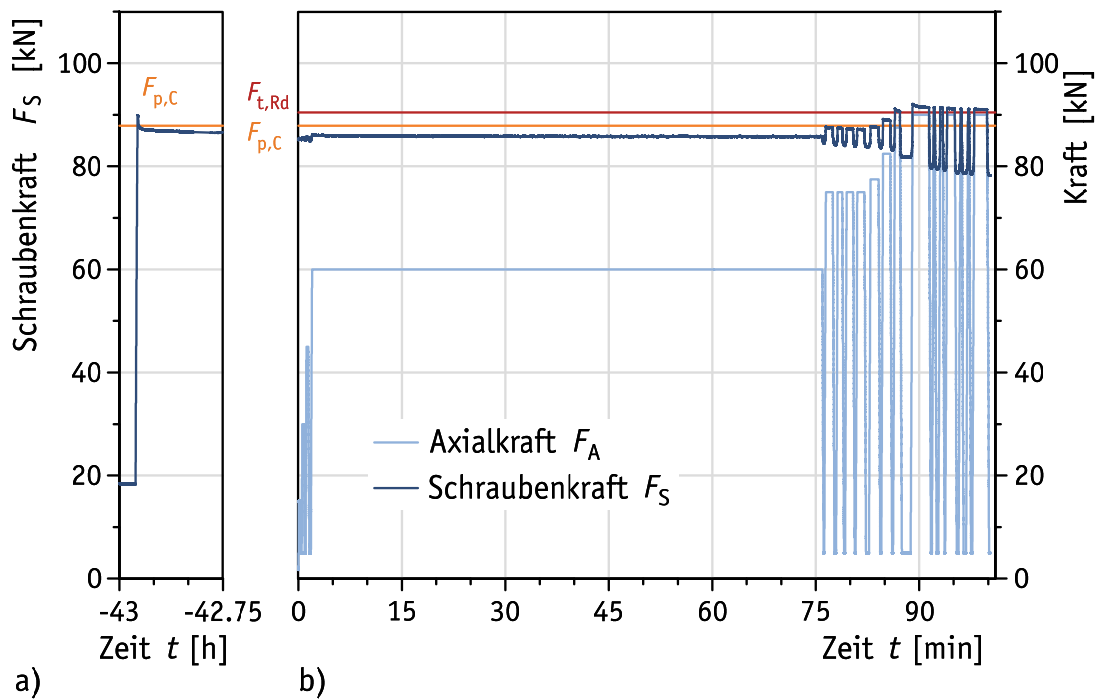
M16 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 24 – Z10						
$F_S$	[kN]		88	89	93	95
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,7	0,71	0,74	0,76
$F_S / F_{p,C}$	[-]		1,0	1,02	1,05	1,08
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,45	0,4	0,4	0,35
		2	0,32	0,3	0,25	0,22
		3	0,125	0,09	0,03	0
		4	0,2	0,15	0,125	0,075
Fühllehre	[mm]	0,25				
$n_{refusal}$	[-]		2	2	2	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,29	0,25	0,22	0,18
$R / 2$	[mm]		±0,19	±0,18	±0,21	±0,2

**Tabelle C.21.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z10 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.21.** Test results: component tensile test No. Z10 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]	=	[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 90 – 70 – Shr062 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 24 – Z10															
M	M			95,3			0,00	1,05	1,08	M			95,3	1,05	1,08
0	0		0,0	89,1			0,00	0,99	1,01	1	-0,3	0,0	89,1	0,99	1,01
1	2	0,1	15,0	89,3	5,93		0,17	0,99	1,02	3	0,4	5,0	89,2	0,99	1,01
2	4	0,6	30,1	89,3	2,97		0,33	0,99	1,02	5	1,1	4,9	89,0	0,98	1,01
3	6	1,3	45,0	89,3	1,98		0,50	0,99	1,02	7	1,8	4,9	88,8	0,98	1,01
4	8	2,1	60,0	89,8	1,50		0,66	0,99	1,02	9	7,8	4,9	88,4	0,98	1,01
5	10	8,1	75,0	90,7	1,21		0,83	1,00	1,03	11	10,2	4,9	87,9	0,97	1,00
6	12	10,5	75,0	90,4	1,21		0,83	1,00	1,03	13	11,0	4,9	87,8	0,97	1,00
7	14	11,3	75,0	90,3	1,21		0,83	1,00	1,03	15	11,9	4,9	87,7	0,97	1,00
8	16	12,2	75,0	90,3	1,20		0,83	1,00	1,03	17	13,4	4,9	87,6	0,97	1,00
9	18	13,7	77,5	90,5	1,17		0,86	1,00	1,03	19	15,3	4,9	87,4	0,97	0,99
10	20	15,7	82,5	91,3	1,11		0,91	1,01	1,04	21	16,8	4,9	87,2	0,96	0,99
11	22	17,3	87,5	92,5	1,06		0,97	1,02	1,05	23	18,3	4,9	86,7	0,96	0,99
12	24	18,6	90,0	93,1	1,03		0,99	1,03	1,06	25	19,6	4,9	86,1	0,95	0,98
13	26	20,0	90,0	92,7	1,03		0,99	1,03	1,05	27	20,9	4,9	85,9	0,95	0,98
14	28	21,4	90,0	92,7	1,03		0,99	1,02	1,05	29	21,9	4,9	85,6	0,95	0,97
15	30	22,2	90,0	92,6	1,03		0,99	1,02	1,05	31	22,9	4,9	85,5	0,95	0,97
16	32	23,2	90,0	92,5	1,03		0,99	1,02	1,05	33	23,8	4,9	85,5	0,95	0,97
17	34	24,1	90,0	92,3	1,03		0,99	1,02	1,05	35	24,7	4,9	85,3	0,94	0,97
18	36	25,0	90,0	92,3	1,03		0,99	1,02	1,05	37	26,6	4,9	85,1	0,94	0,97


**M16 × 100 – 80 – Shr018 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 25 – Z11**

Shr.HV | Shb.H | 69 | DTI.H8 | Shb.HN | Mu.HV.rot


**Bild C.13.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z11 (mit DTI)

**Figure C.13.** Test results: component tensile test No. Z11 (including DTI)

**Tabelle C.22.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z11 (mit DTI) – Anziehen**Table C.22.** Test results: component tensile test No. Z11 (including DTI) – tightening

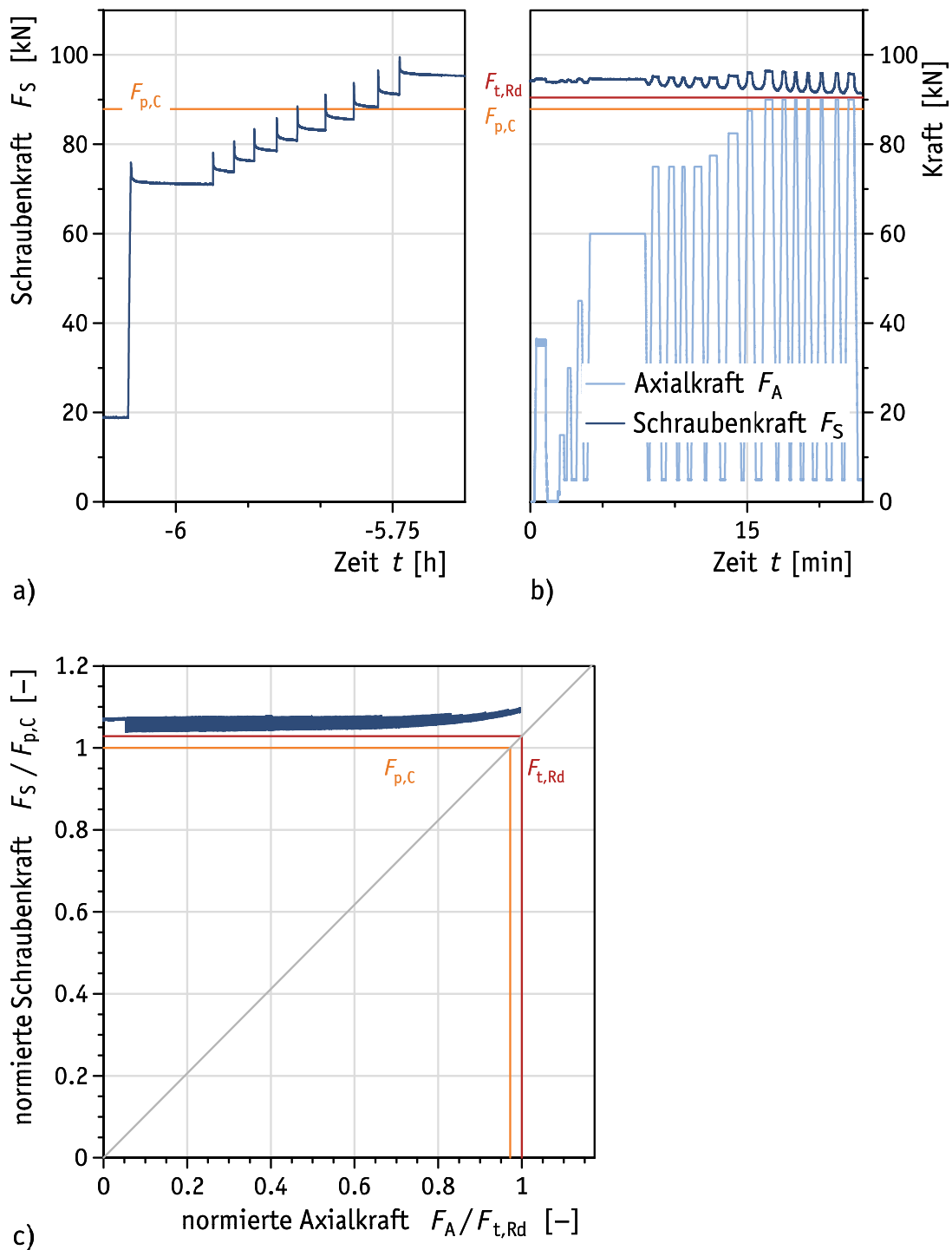
M16 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 25 – Z11			
$F_S$	[kN]		92
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,73
$F_S / F_{p,C}$	[-]		1,05
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0
		2	0,18
		3	0,4
		4	0,22
Fühllehre	[mm]	0,25	
$n_{refusal}$	[-]		3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,22
$R/2$	[mm]		±0,23

**Tabelle C.23.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z11 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.23.** Test results: component tensile test No. Z11 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 100 – 80 – Shr018 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 25 – Z11															
M	M			92,0			0,00	1,02	1,05	M			92,0	1,02	1,05
0	0		0,0	85,1			0,00	0,94	0,97	1	-0,2	0,0	85,1	0,94	0,97
1	2	0,1	15,0	85,4	5,70		0,17	0,94	0,97	3	0,4	4,9	85,2	0,94	0,97
2	4	0,6	30,0	85,6	2,85		0,33	0,95	0,97	5	1,0	4,9	85,1	0,94	0,97
3	6	1,2	45,0	85,7	1,91		0,50	0,95	0,98	7	1,7	4,9	85,0	0,94	0,97
4	8	2,0	60,0	86,1	1,44		0,66	0,95	0,98	9	76,2	4,9	84,5	0,93	0,96
5	10	76,5	75,0	87,7	1,17		0,83	0,97	1,00	11	77,8	4,9	84,2	0,93	0,96
6	12	78,2	75,0	87,5	1,17		0,83	0,97	0,99	13	79,2	4,9	84,0	0,93	0,96
7	14	79,5	75,0	87,3	1,16		0,83	0,96	0,99	15	80,7	4,9	83,9	0,93	0,95
8	16	81,1	75,0	87,2	1,16		0,83	0,96	0,99	17	82,5	4,9	83,8	0,93	0,95
9	18	83,0	77,5	87,7	1,13		0,86	0,97	1,00	19	84,4	4,9	83,6	0,92	0,95
10	20	84,8	82,5	89,2	1,08		0,91	0,99	1,01	21	86,2	4,9	83,1	0,92	0,94
11	22	86,5	87,5	91,2	1,04		0,97	1,01	1,04	23	88,1	4,9	81,7	0,90	0,93
12	24	89,1	90,0	92,1	1,02		0,99	1,02	1,05	25	91,8	4,9	79,7	0,88	0,91
13	26	92,1	90,0	91,4	1,02		0,99	1,01	1,04	27	92,7	4,9	79,5	0,88	0,90
14	28	93,1	90,0	91,3	1,02		0,99	1,01	1,04	29	93,7	4,9	79,2	0,88	0,90
15	30	94,1	90,0	91,3	1,01		0,99	1,01	1,04	31	95,6	4,9	78,7	0,87	0,90
16	32	96,0	90,0	91,1	1,01		0,99	1,01	1,04	33	96,6	4,9	78,6	0,87	0,89
17	34	97,1	90,0	91,1	1,01		0,99	1,01	1,04	35	97,6	4,9	78,6	0,87	0,89
18	36	98,0	90,0	91,1	1,01		0,99	1,01	1,04	37	100,3	4,9	78,3	0,87	0,89













**M16 × 100 – 80 – Shr008 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 26 – Z12**

Shr.HV | Shb.H | 69 | DTI.H8 | Shb.HN | Mu.HV.rot


**Bild C.14.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z12 (mit DTI)

**Figure C.14.** Test results: component tensile test No. Z12 (including DTI)

**Tabelle C.24.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z12 (mit DTI) – Anziehen**Table C.24.** Test results: component tensile test No. Z12 (including DTI) – tightening

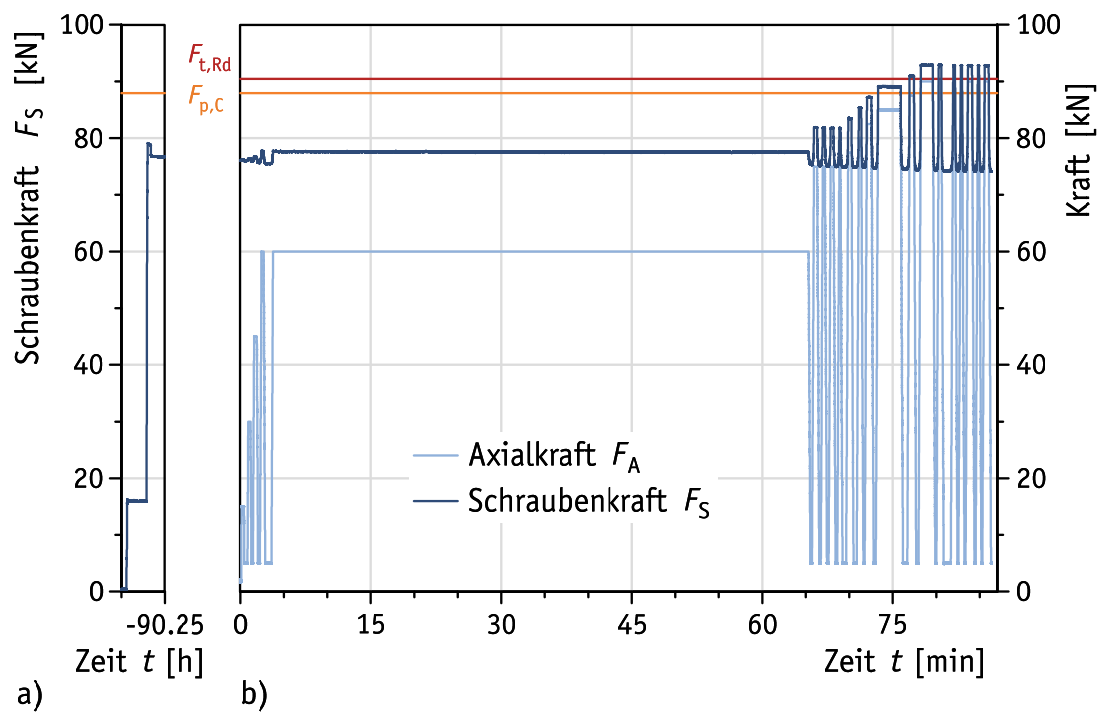
M16 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 26 – Z12												
$F_S$	[kN]		76	78	81	83	86	88	91	94	97	99
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,6	0,62	0,64	0,66	0,68	0,7	0,73	0,75	0,77	0,79
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,86	0,89	0,92	0,95	0,98	1,01	1,04	1,07	1,1	1,13
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,5	0,5	0,45	0,4	0,35	0,35	0,32	0,3	0,25	0,22
		2	0,4	0,35	0,32	0,25	0,2	0,125	0,09	0,04	0	0
		3	0,4	0,4	0,32	0,28	0,25	0,15	0,1	0,07	0,03	0
		4	0,45	0,4	0,4	0,4	0,35	0,32	0,32	0,28	0,25	0,22
Fühllehre	[mm]	0,25										
$n_{refusal}$	[-]		0	0	0	0	1	2	2	2	2	4
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,46	0,44	0,39	0,35	0,31	0,25	0,22	0,18	0,15	0,12
$R / 2$	[mm]		±0,08	±0,1	±0,09	±0,1	±0,1	±0,14	±0,13	±0,14	±0,14	±0,13

**Tabelle C.25.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z12 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.25.** Test results: component tensile test No. Z12 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]	=	[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 100 – 80 – Shr008 – H8 – AND-A1 – Mu.rot – 26 – Z12															
M	M			99,4			0,00	1,10	1,13	M			99,4	1,10	1,13
0	0		0,0	94,1			0,00	1,04	1,07	1	-0,1	0,0	94,1	1,04	1,07
1	2	0,4	36,2	94,6	2,61		0,40	1,05	1,08	3	1,5	0,1	93,9	1,04	1,07
2	4	2,1	15,0	94,2	6,28		0,17	1,04	1,07	5	2,4	4,9	94,0	1,04	1,07
3	6	2,6	30,0	94,4	3,15		0,33	1,04	1,07	7	3,0	4,9	94,0	1,04	1,07
4	8	3,3	45,0	94,6	2,10		0,50	1,05	1,08	9	3,9	4,9	93,8	1,04	1,07
5	10	4,1	60,0	94,7	1,58		0,66	1,05	1,08	11	8,2	4,9	93,4	1,03	1,06
6	12	8,5	75,0	95,2	1,27		0,83	1,05	1,08	13	9,3	4,9	93,1	1,03	1,06
7	14	9,6	75,0	94,9	1,27		0,83	1,05	1,08	15	10,2	4,9	93,0	1,03	1,06
8	16	10,5	75,0	94,8	1,26		0,83	1,05	1,08	17	11,0	4,9	92,9	1,03	1,06
9	18	11,4	75,0	94,8	1,26		0,83	1,05	1,08	19	12,1	4,9	92,8	1,03	1,06
10	20	12,4	77,5	94,9	1,23		0,86	1,05	1,08	21	13,3	4,9	92,7	1,02	1,05
11	22	13,7	82,5	95,4	1,16		0,91	1,05	1,08	23	14,7	4,9	92,5	1,02	1,05
12	24	15,0	87,5	96,1	1,10		0,97	1,06	1,09	25	15,8	4,9	92,4	1,02	1,05
13	26	16,3	90,0	96,5	1,07		0,99	1,07	1,10	27	17,1	4,9	92,1	1,02	1,05
14	28	17,5	90,0	96,1	1,07		0,99	1,06	1,09	29	18,0	4,9	92,0	1,02	1,05
15	30	18,3	90,0	96,1	1,07		0,99	1,06	1,09	31	18,8	4,9	91,8	1,02	1,04
16	32	19,2	90,0	95,9	1,07		0,99	1,06	1,09	33	19,7	5,0	91,7	1,01	1,04
17	34	20,1	90,0	95,9	1,07		0,99	1,06	1,09	35	20,7	4,9	91,6	1,01	1,04
18	36	21,1	90,0	95,8	1,06		0,99	1,06	1,09	37	21,6	4,9	91,5	1,01	1,04
19	38	22,0	90,0	95,8	1,06		0,99	1,06	1,09	39	22,8	4,9	91,5	1,01	1,04

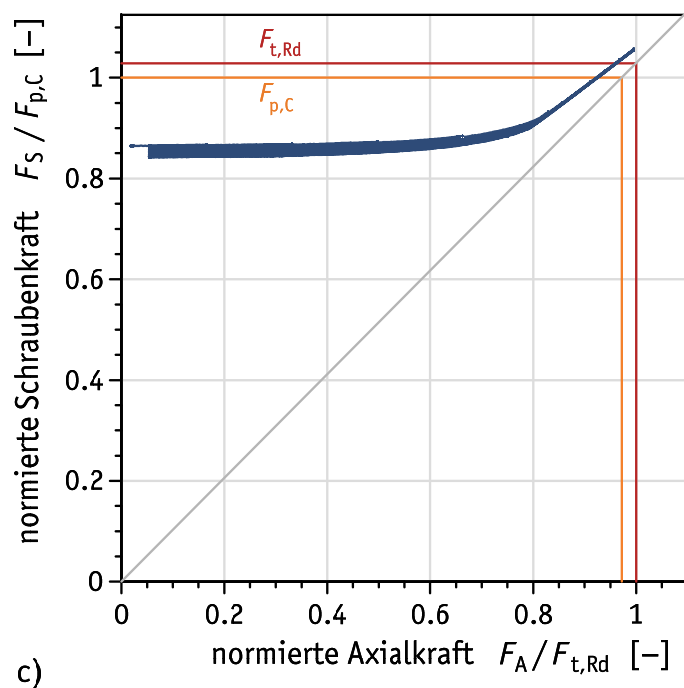
**M16 × 90 – 71 – Shr061 – H8 – Vgl – Z13**

Shr.HV | Shb.H | Shb.H | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot



a)

b)



c)

**Bild C.15.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z13 (ohne DTI)**Figure C.15.** Test results: component tensile test No. Z13 (without DTI)

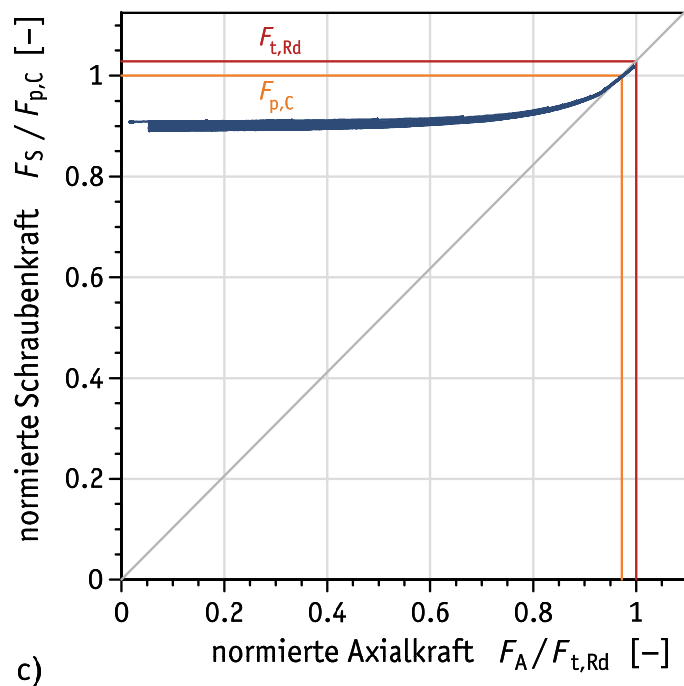
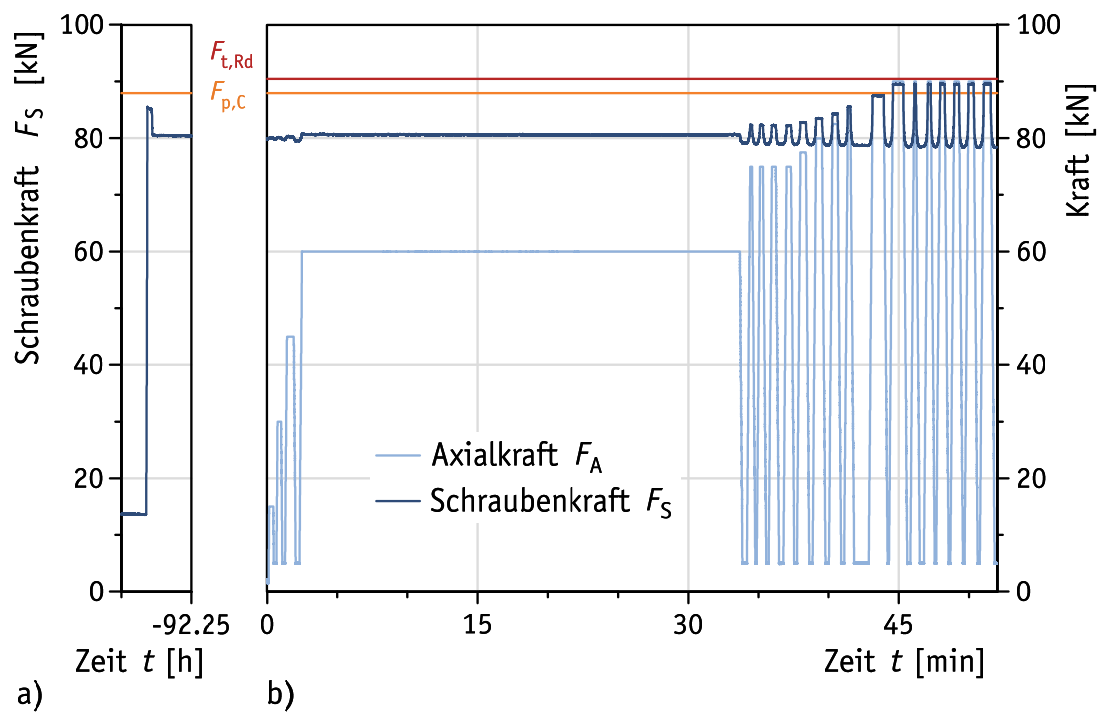


**Tabelle C.26.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z13 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.26.** Test results: component tensile test No. Z13 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	Klaffen =	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M16 × 90 – 71 – Shr061 – H8 – Vgl – Z13</b>															
M	M			77,0			0,00	0,85	0,88	M			77,0	0,85	0,88
0	0		0,0	75,9			0,00	0,84	0,86	1	-0,4	0,0	75,9	0,84	0,86
1	2	0,1	15,0	76,2	5,09		0,17	0,84	0,87	3	0,6	4,9	76,1	0,84	0,87
2	4	0,9	30,0	76,3	2,55		0,33	0,84	0,87	5	1,3	4,9	76,0	0,84	0,86
3	6	1,6	45,0	76,7	1,71		0,50	0,85	0,87	7	2,1	4,9	75,7	0,84	0,86
4	8	2,4	60,0	77,7	1,30		0,66	0,86	0,88	9	3,2	4,9	75,5	0,83	0,86
5	10	3,8	60,0	77,7	1,30		0,66	0,86	0,88	11	65,6	4,9	75,3	0,83	0,86
6	12	66,0	75,0	81,9	1,09		0,83	0,91	0,93	13	66,6	4,9	75,1	0,83	0,85
7	14	67,0	75,0	81,7	1,09		0,83	0,90	0,93	15	67,5	4,9	75,0	0,83	0,85
8	16	67,9	75,0	81,7	1,09		0,83	0,90	0,93	17	68,5	4,9	75,0	0,83	0,85
9	18	68,9	75,0	81,7	1,09		0,83	0,90	0,93	19	69,4	4,9	75,0	0,83	0,85
10	20	69,9	77,5	83,5	1,08		0,86	0,92	0,95	21	70,7	4,9	75,0	0,83	0,85
11	22	71,1	80,0	85,3	1,07		0,88	0,94	0,97	23	71,7	4,9	74,8	0,83	0,85
12	24	72,0	82,5	87,2	1,06		0,91	0,96	0,99	25	72,9	4,9	74,7	0,83	0,85
13	26	73,3	85,0	89,1	1,05		0,94	0,98	1,01	27	76,4	4,9	74,5	0,82	0,85
14	28	76,9	87,5	90,9	1,04		0,97	1,01	1,03	29	77,8	4,9	74,4	0,82	0,85
15	30	78,2	90,0	92,8	1,03		0,99	1,03	1,06	31	79,9	4,9	74,3	0,82	0,84
16	32	80,3	90,0	92,8	1,03		0,99	1,03	1,06	33	81,2	4,9	74,2	0,82	0,84
17	34	82,0	90,0	92,8	1,03		0,99	1,03	1,05	35	82,4	4,9	74,2	0,82	0,84
18	36	82,8	90,0	92,8	1,03		0,99	1,03	1,06	37	83,3	4,9	74,1	0,82	0,84
19	38	83,7	90,0	92,8	1,03		0,99	1,03	1,06	39	84,4	4,9	74,1	0,82	0,84
20	40	84,8	90,0	92,8	1,03		0,99	1,03	1,06	41	85,2	4,9	74,1	0,82	0,84
21	42	85,6	90,0	92,8	1,03		0,99	1,03	1,06	43	86,4	4,9	74,0	0,82	0,84

**M16 × 90 – 71 – Shr062 – H8 – Vgl – Z14**

Shr.HV | Shb.H | Shb.H | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.16.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z14 (ohne DTI)

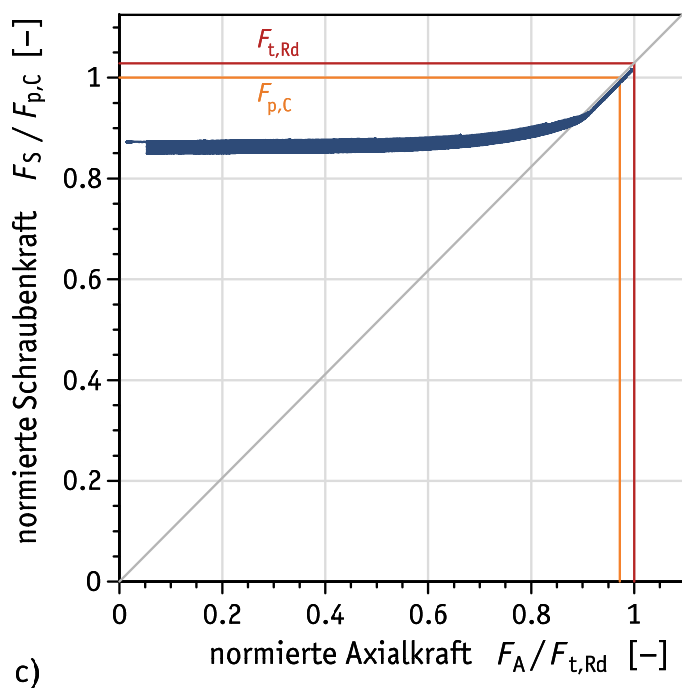
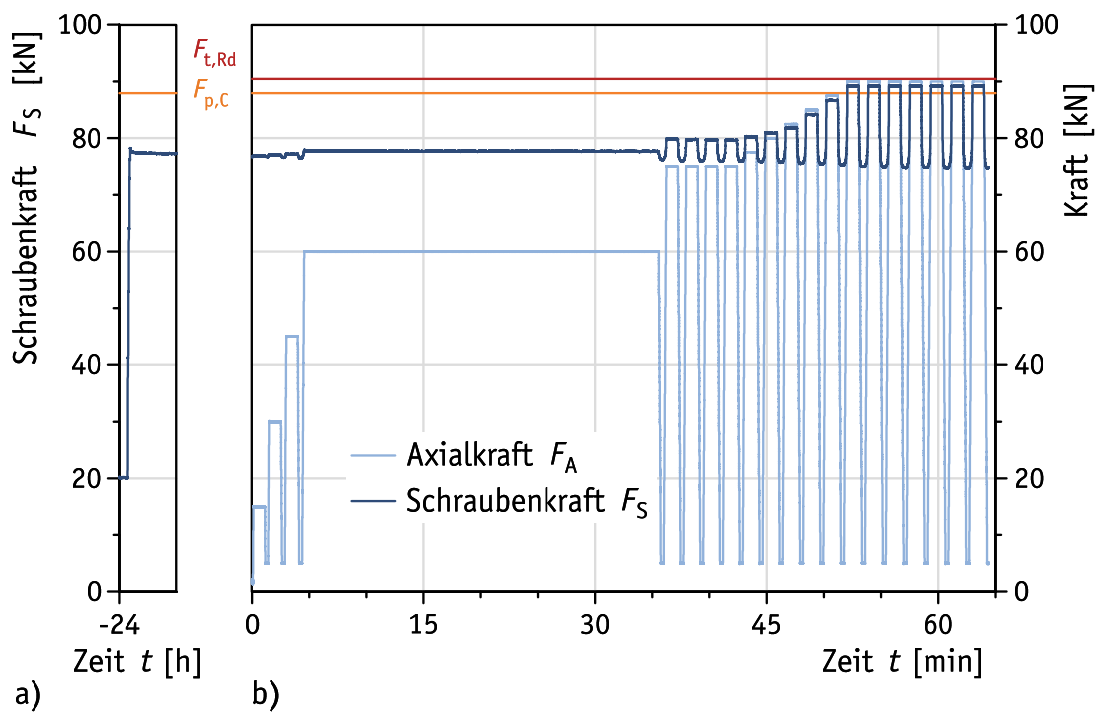
**Figure C.16.** Test results: component tensile test No. Z14 (without DTI)

**Tabelle C.27.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z14 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.27.** Test results: component tensile test No. Z14 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M16 × 90 – 71 – Shr062 – H8 – Vgl – Z14</b>															
M	M			80,8			0,00	0,89	0,92	M			80,8	0,89	0,92
0	0		0,0	79,8			0,00	0,88	0,91	1	-0,3	0,0	79,8	0,88	0,91
1	2	0,2	15,0	80,0	5,34		0,17	0,88	0,91	3	0,6	4,9	79,8	0,88	0,91
2	4	0,8	30,0	80,1	2,67		0,33	0,89	0,91	5	1,2	4,9	79,7	0,88	0,91
3	6	1,4	45,0	80,3	1,79		0,50	0,89	0,91	7	2,2	4,9	79,6	0,88	0,90
4	8	2,5	60,0	80,8	1,35		0,66	0,89	0,92	9	34,0	4,9	79,1	0,87	0,90
5	10	34,4	75,0	82,3	1,10		0,83	0,91	0,94	11	34,8	4,9	78,9	0,87	0,90
6	12	35,1	75,0	82,3	1,10		0,83	0,91	0,94	13	35,6	4,9	78,9	0,87	0,90
7	14	36,0	75,0	82,3	1,10		0,83	0,91	0,94	15	36,6	4,9	78,9	0,87	0,90
8	16	37,0	75,0	82,2	1,10		0,83	0,91	0,93	17	37,6	4,9	78,9	0,87	0,90
9	18	38,0	77,5	82,7	1,07		0,86	0,91	0,94	19	38,7	4,9	78,9	0,87	0,90
10	20	39,1	80,0	83,4	1,04		0,88	0,92	0,95	21	39,9	4,9	78,8	0,87	0,90
11	22	40,3	82,5	84,3	1,02		0,91	0,93	0,96	23	41,0	4,9	78,8	0,87	0,90
12	24	41,4	85,0	85,4	1,01		0,94	0,94	0,97	25	42,3	4,9	78,8	0,87	0,90
13	26	43,1	87,5	87,5	1,00	=	0,97	0,97	1,00	27	44,2	5,0	78,6	0,87	0,89
14	28	44,6	90,0	89,4	0,99	=	0,99	0,99	1,02	29	45,7	4,9	78,5	0,87	0,89
15	30	46,1	90,0	89,5	0,99	=	0,99	0,99	1,02	31	46,6	4,9	78,5	0,87	0,89
16	32	47,1	90,0	89,5	0,99	=	0,99	0,99	1,02	33	47,6	4,9	78,5	0,87	0,89
17	34	47,9	90,0	89,6	1,00	=	0,99	0,99	1,02	35	48,6	4,9	78,5	0,87	0,89
18	36	49,0	90,0	89,5	0,99	=	0,99	0,99	1,02	37	49,6	4,9	78,4	0,87	0,89
19	38	50,0	90,0	89,5	0,99	=	0,99	0,99	1,02	39	50,7	4,9	78,4	0,87	0,89
20	40	51,1	90,0	89,5	0,99	=	0,99	0,99	1,02	41	51,9	4,9	78,4	0,87	0,89

**M16 × 100 – 81 – Shr018 – H8 – Vgl – Z15**

Shr.HV | Shb.H | Shb.H | 69 | Shb.H | Mu.HV.rot

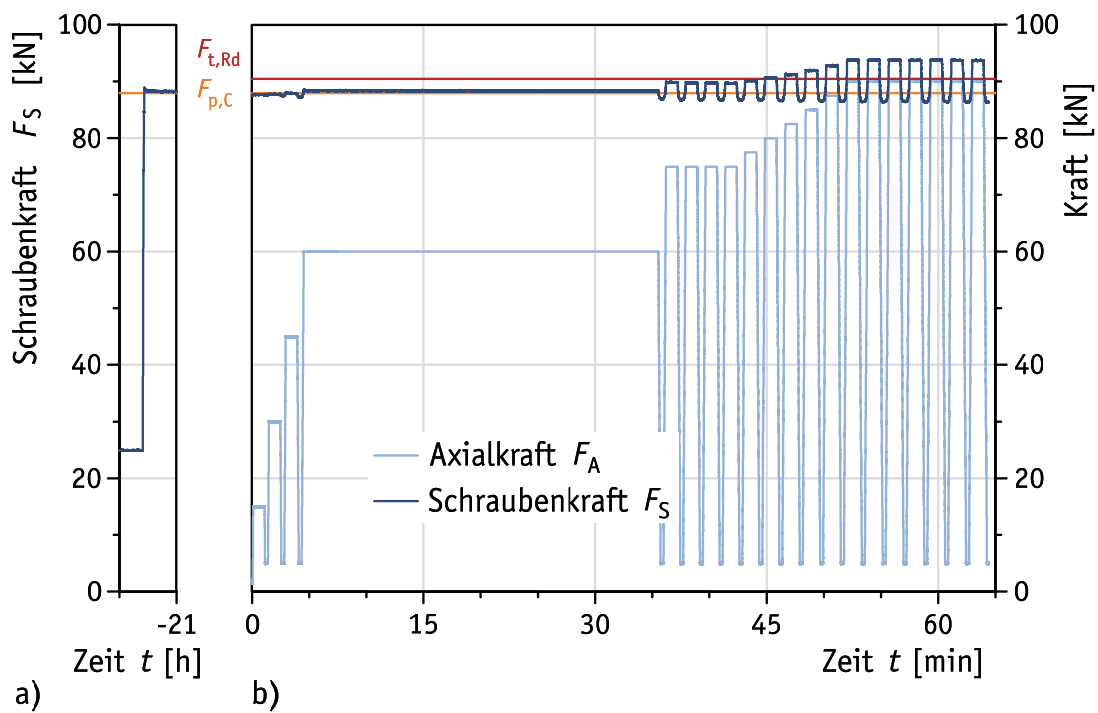
**Bild C.17.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z15 (ohne DTI)**Figure C.17.** Test results: component tensile test No. Z15 (without DTI)

**Tabelle C.28.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z15 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.28.** Test results: component tensile test No. Z15 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	Klaffen =	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M16 × 100 – 81 – Shr018 – H8 – Vgl – Z15</b>															
M	M			77,8			0,00	0,86	0,88	M			77,8	0,86	0,88
0	0		0,0	76,7			0,00	0,85	0,87	1	-0,3	0,0	76,7	0,85	0,87
1	2	0,1	15,0	76,8	5,12		0,17	0,85	0,87	3	1,3	4,9	76,7	0,85	0,87
2	4	1,5	30,0	77,1	2,57		0,33	0,85	0,88	5	2,7	4,9	76,6	0,85	0,87
3	6	3,0	44,9	77,2	1,72		0,50	0,85	0,88	7	4,2	4,9	76,4	0,85	0,87
4	8	4,6	60,0	77,9	1,30		0,66	0,86	0,89	9	35,9	4,9	76,2	0,84	0,87
5	10	36,2	75,0	79,9	1,07		0,83	0,88	0,91	11	37,6	4,9	76,0	0,84	0,86
6	12	38,0	75,0	79,7	1,06		0,83	0,88	0,91	13	39,3	4,9	76,0	0,84	0,86
7	14	39,7	75,0	79,7	1,06		0,83	0,88	0,91	15	41,0	4,9	75,9	0,84	0,86
8	16	41,4	75,0	79,6	1,06		0,83	0,88	0,91	17	42,8	4,9	75,9	0,84	0,86
9	18	43,1	77,5	80,3	1,04		0,86	0,89	0,91	19	44,5	4,9	75,8	0,84	0,86
10	20	44,9	80,0	81,0	1,01		0,88	0,90	0,92	21	46,2	4,9	75,7	0,84	0,86
11	22	46,7	82,5	81,8	0,99	=	0,91	0,91	0,93	23	48,0	4,9	75,5	0,83	0,86
12	24	48,4	85,0	84,2	0,99	=	0,94	0,93	0,96	25	49,8	4,9	75,4	0,83	0,86
13	26	50,2	87,5	86,6	0,99	=	0,97	0,96	0,99	27	51,6	4,9	75,3	0,83	0,86
14	28	52,1	90,0	89,2	0,99	=	0,99	0,99	1,01	29	53,4	4,9	75,0	0,83	0,85
15	30	53,9	90,0	89,2	0,99	=	0,99	0,99	1,01	31	55,3	4,9	74,8	0,83	0,85
16	32	55,7	90,0	89,2	0,99	=	0,99	0,99	1,01	33	57,1	4,9	74,8	0,83	0,85
17	34	57,5	90,0	89,2	0,99	=	0,99	0,99	1,01	35	58,9	4,9	74,8	0,83	0,85
18	36	59,4	90,0	89,2	0,99	=	0,99	0,99	1,01	37	60,7	4,9	74,7	0,83	0,85
19	38	61,2	90,0	89,2	0,99	=	0,99	0,99	1,01	39	62,6	4,9	74,7	0,83	0,85
20	40	63,0	90,0	89,1	0,99	=	0,99	0,99	1,01	41	64,4	4,9	74,8	0,83	0,85

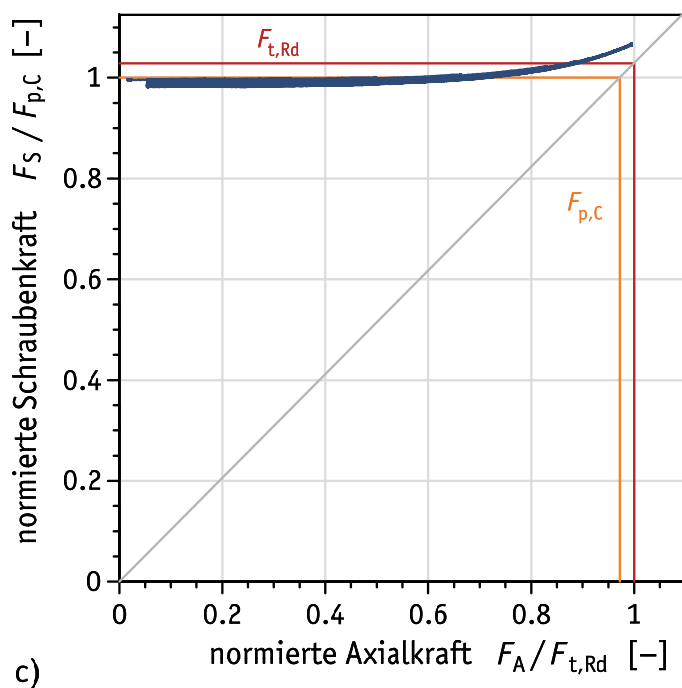
**M16 × 90 – 71 – Shr061 – H8 – Vgl – Z16**

Shr.HV | Shb.H | Shb.H | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot



a)

b)



c)

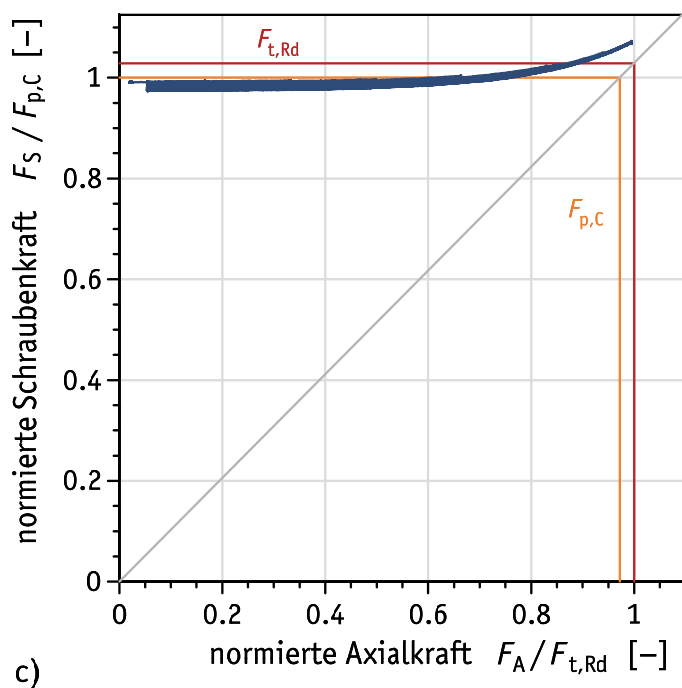
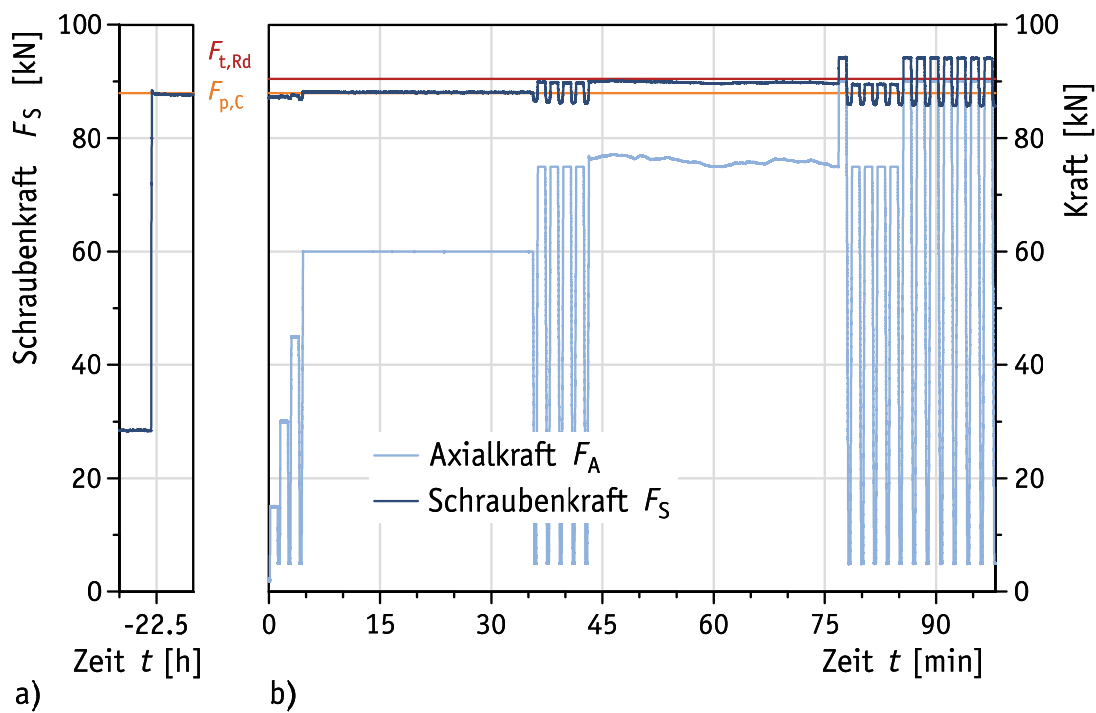
**Bild C.18.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z16 (ohne DTI)**Figure C.18.** Test results: component tensile test No. Z16 (without DTI)

**Tabelle C.29.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z16 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.29.** Test results: component tensile test No. Z16 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M16 × 90 – 71 – Shr061 – H8 – Vgl – Z16</b>															
M	M			88,9			0,00	0,98	1,01	M			88,9	0,98	1,01
0	0		0,1	87,5			0,00	0,97	1,00	1	-0,1	0,1	87,5	0,97	1,00
1	2	0,1	15,0	87,7	5,86		0,17	0,97	1,00	3	1,3	4,9	87,6	0,97	1,00
2	4	1,5	29,8	87,7	2,95		0,33	0,97	1,00	5	2,7	4,9	87,4	0,97	0,99
3	6	3,0	45,0	88,0	1,95		0,50	0,97	1,00	7	4,2	4,9	87,2	0,96	0,99
4	8	4,5	60,0	88,5	1,47		0,66	0,98	1,01	9	35,9	4,9	86,9	0,96	0,99
5	10	36,2	75,0	89,9	1,20		0,83	0,99	1,02	11	37,6	4,9	86,8	0,96	0,99
6	12	37,9	75,0	89,8	1,20		0,83	0,99	1,02	13	39,3	4,9	86,8	0,96	0,99
7	14	39,7	75,0	89,7	1,20		0,83	0,99	1,02	15	41,0	4,9	86,7	0,96	0,99
8	16	41,4	75,0	89,7	1,20		0,83	0,99	1,02	17	42,7	4,9	86,7	0,96	0,99
9	18	43,1	77,5	90,2	1,16		0,86	1,00	1,03	19	44,5	4,9	86,7	0,96	0,99
10	20	44,9	80,0	90,7	1,13		0,88	1,00	1,03	21	46,3	4,9	86,6	0,96	0,98
11	22	46,6	82,5	91,2	1,11		0,91	1,01	1,04	23	48,0	4,9	86,6	0,96	0,98
12	24	48,4	85,0	91,9	1,08		0,94	1,02	1,05	25	49,8	4,9	86,5	0,96	0,98
13	26	50,2	87,5	92,8	1,06		0,97	1,03	1,06	27	51,6	4,9	86,5	0,96	0,98
14	28	52,0	90,0	93,8	1,04		0,99	1,04	1,07	29	53,4	4,9	86,5	0,96	0,98
15	30	53,9	90,0	93,7	1,04		0,99	1,04	1,07	31	55,3	4,9	86,4	0,96	0,98
16	32	55,7	90,0	93,7	1,04		0,99	1,04	1,07	33	57,1	4,9	86,5	0,96	0,98
17	34	57,5	90,0	93,7	1,04		0,99	1,04	1,07	35	58,9	4,9	86,4	0,96	0,98
18	36	59,3	90,0	93,7	1,04		0,99	1,04	1,07	37	60,7	4,9	86,4	0,96	0,98
19	38	61,2	90,0	93,7	1,04		0,99	1,04	1,07	39	62,6	4,9	86,3	0,95	0,98
20	40	63,0	90,0	93,6	1,04		0,99	1,04	1,07	41	64,4	4,9	86,3	0,95	0,98

**M16 × 90 – 71 – Shr062 – H8 – Vgl – Z17**

Shr.HV | Shb.H | Shb.H | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.19.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z17 (ohne DTI)

**Figure C.19.** Test results: component tensile test No. Z17 (without DTI)

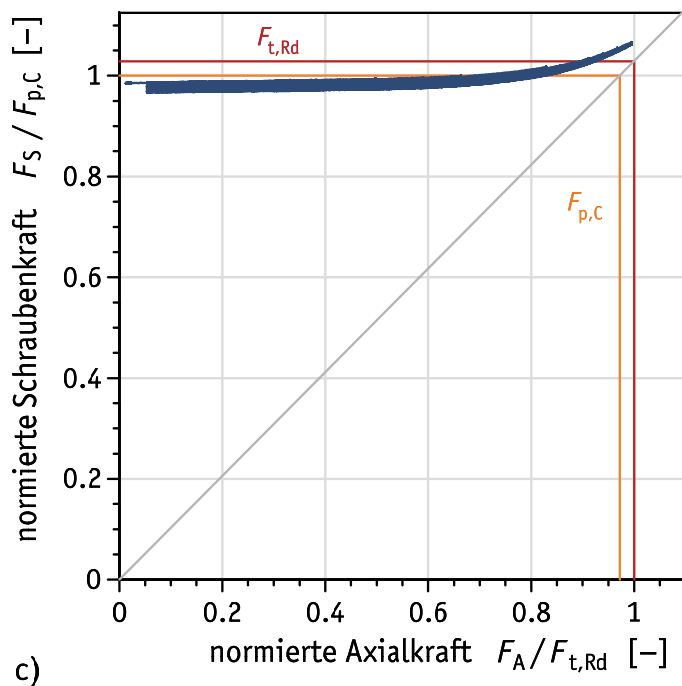
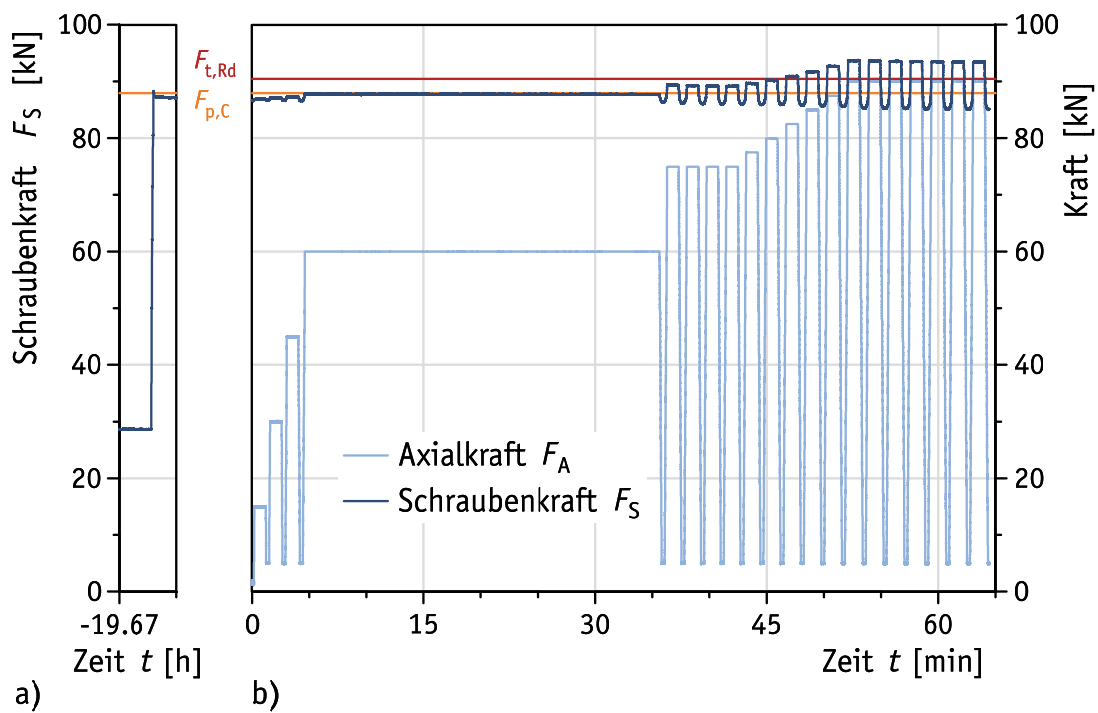


**Tabelle C.30.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z17 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.30.** Test results: component tensile test No. Z17 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M16 × 90 – 71 – Shr062 – H8 – Vgl – Z17</b>															
M	M			88,3			0,00	0,98	1,00	M			88,3	0,98	1,00
0	0		0,0	87,2			0,00	0,96	0,99	1	-0,3	0,0	87,2	0,96	0,99
1	2	0,2	15,1	87,2	5,80		0,17	0,96	0,99	3	1,4	4,9	87,1	0,96	0,99
2	4	1,6	30,0	87,4	2,91		0,33	0,97	0,99	5	2,8	4,9	87,1	0,96	0,99
3	6	3,0	45,1	87,6	1,94		0,50	0,97	1,00	7	4,3	4,9	86,8	0,96	0,99
4	8	4,6	60,1	88,2	1,47		0,66	0,98	1,00	9	35,9	4,9	86,5	0,96	0,98
5	10	36,3	75,0	89,9	1,20		0,83	0,99	1,02	11	37,7	4,9	86,3	0,95	0,98
6	12	38,0	75,0	89,7	1,20		0,83	0,99	1,02	13	39,3	4,9	86,3	0,95	0,98
7	14	39,7	75,0	89,7	1,20		0,83	0,99	1,02	15	41,1	4,9	86,2	0,95	0,98
8	16	41,5	75,0	89,6	1,20		0,83	0,99	1,02	17	42,8	4,9	86,1	0,95	0,98
9	18	76,9	90,0	94,2	1,05		0,99	1,04	1,07	19	78,3	4,9	86,0	0,95	0,98
10	20	78,7	75,0	89,4	1,19		0,83	0,99	1,02	21	80,0	4,9	85,9	0,95	0,98
11	22	80,4	75,0	89,5	1,19		0,83	0,99	1,02	23	81,8	4,9	85,9	0,95	0,98
12	24	82,1	75,0	89,4	1,19		0,83	0,99	1,02	25	83,5	4,9	85,9	0,95	0,98
13	26	83,9	75,0	89,5	1,19		0,83	0,99	1,02	27	85,2	4,9	86,0	0,95	0,98
14	28	85,6	90,0	94,1	1,05		0,99	1,04	1,07	29	87,0	4,9	85,9	0,95	0,98
15	30	87,5	90,0	94,0	1,05		1,00	1,04	1,07	31	88,9	4,9	85,8	0,95	0,98
16	32	89,3	90,0	94,2	1,05		0,99	1,04	1,07	33	90,7	4,9	85,8	0,95	0,98
17	34	91,1	90,0	94,1	1,05		1,00	1,04	1,07	35	92,5	4,9	85,8	0,95	0,98
18	36	92,9	90,0	94,1	1,05		0,99	1,04	1,07	37	94,4	4,9	85,8	0,95	0,98
19	38	94,7	90,0	94,0	1,05		0,99	1,04	1,07	39	96,1	4,9	85,7	0,95	0,97
20	40	96,6	90,0	94,1	1,05		0,99	1,04	1,07	41	98,0	4,9	85,7	0,95	0,97

**M16 × 100 – 81 – Shr018 – H8 – Vgl – Z18**

Shr.HV | Shb.H | Shb.H | 69 | Shb.H | Mu.HV.rot

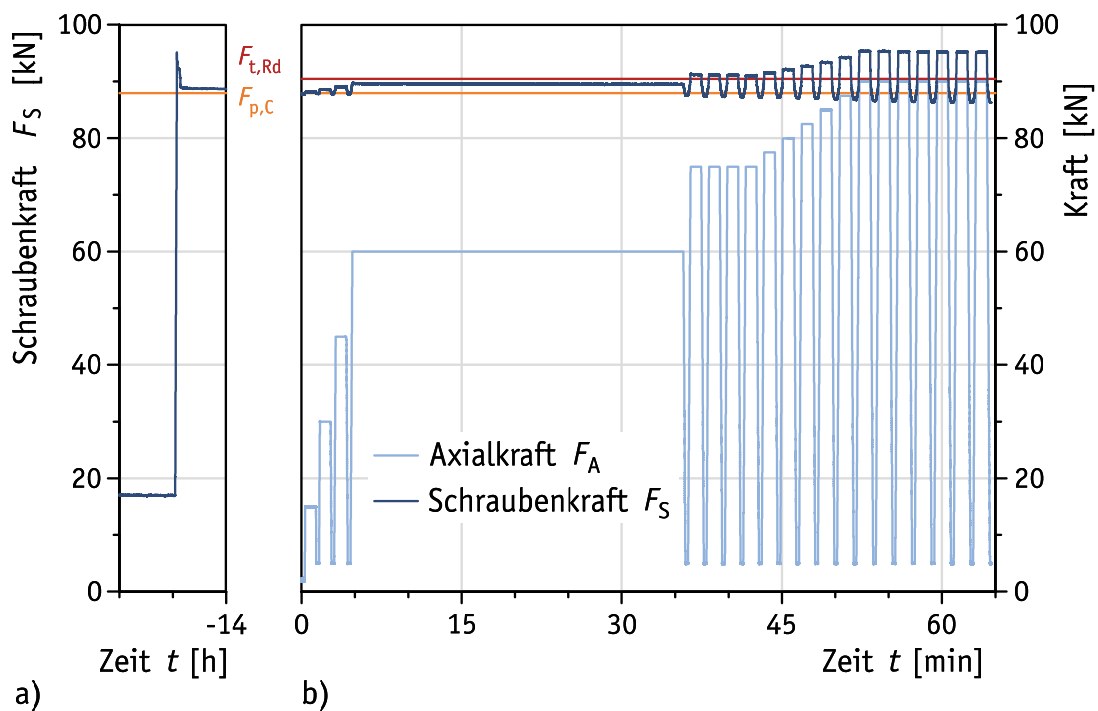
**Bild C.20.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z18 (ohne DTI)**Figure C.20.** Test results: component tensile test No. Z18 (without DTI)

**Tabelle C.31.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z18 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.31.** Test results: component tensile test No. Z18 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,c}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,c}$ [-]
M16 × 100 – 81 – Shr018 – H8 – Vgl – Z18															
M	M			87,5			0,00	0,97	1,00	M			87,5	0,97	1,00
0	0		0,0	86,6			0,00	0,96	0,98	1	-0,3	0,0	86,6	0,96	0,98
1	2	0,2	15,1	86,8	5,76		0,17	0,96	0,99	3	1,4	4,9	86,8	0,96	0,99
2	4	1,6	30,0	87,1	2,90		0,33	0,96	0,99	5	2,8	4,9	86,7	0,96	0,99
3	6	3,1	45,1	87,3	1,94		0,50	0,96	0,99	7	4,3	4,9	86,6	0,96	0,98
4	8	4,6	60,0	87,8	1,46		0,66	0,97	1,00	9	35,9	4,9	86,3	0,95	0,98
5	10	36,3	75,0	89,4	1,19		0,83	0,99	1,02	11	37,7	4,9	86,2	0,95	0,98
6	12	38,0	75,0	89,3	1,19		0,83	0,99	1,02	13	39,4	4,9	86,0	0,95	0,98
7	14	39,8	75,0	89,2	1,19		0,83	0,99	1,01	15	41,2	4,9	86,0	0,95	0,98
8	16	41,5	75,0	89,2	1,19		0,83	0,99	1,01	17	42,9	4,9	86,1	0,95	0,98
9	18	43,2	77,5	89,7	1,16		0,86	0,99	1,02	19	44,6	4,9	86,0	0,95	0,98
10	20	45,0	80,0	90,2	1,13		0,88	1,00	1,03	21	46,3	4,9	86,0	0,95	0,98
11	22	46,7	82,5	90,9	1,10		0,91	1,00	1,03	23	48,1	4,9	85,9	0,95	0,98
12	24	48,5	85,0	91,7	1,08		0,94	1,01	1,04	25	49,9	4,9	85,6	0,95	0,97
13	26	50,3	87,5	92,7	1,06		0,97	1,03	1,05	27	51,7	4,9	85,5	0,95	0,97
14	28	52,1	90,0	93,7	1,04		1,00	1,04	1,07	29	53,5	4,9	85,3	0,94	0,97
15	30	53,9	90,0	93,6	1,04		0,99	1,03	1,06	31	55,4	4,9	85,3	0,94	0,97
16	32	55,8	90,0	93,5	1,04		0,99	1,03	1,06	33	57,2	4,9	85,3	0,94	0,97
17	34	57,6	90,0	93,4	1,04		0,99	1,03	1,06	35	59,0	4,9	85,2	0,94	0,97
18	36	59,4	90,0	93,4	1,04		0,99	1,03	1,06	37	60,8	4,9	85,1	0,94	0,97
19	38	61,2	90,0	93,4	1,04		0,99	1,03	1,06	39	62,6	4,9	85,2	0,94	0,97
20	40	63,1	90,0	93,4	1,04		0,99	1,03	1,06	41	64,5	4,9	85,1	0,94	0,97

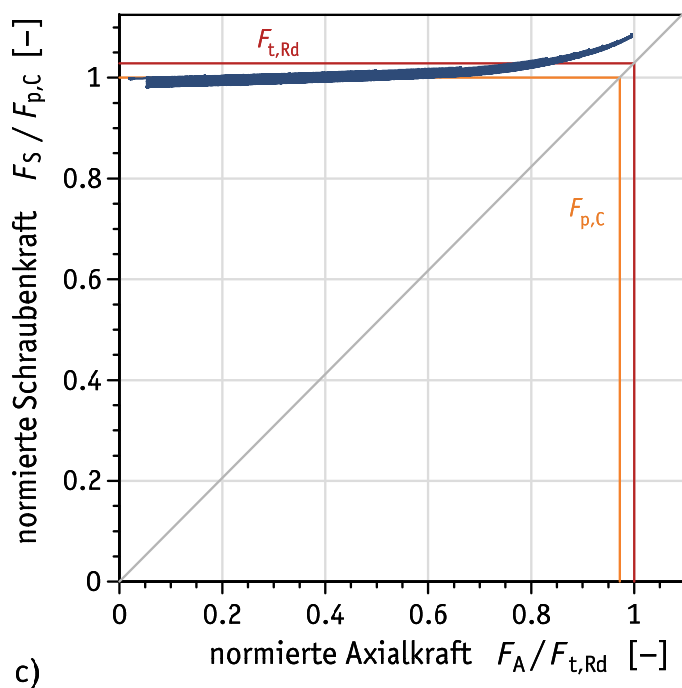
**M16 × 100 – 78 – Shr008 – H8 – Vgl – Z19**

Shr.HV | Shb.H | 70 | Shb.H | Mu.HV.rot



a)

b)



c)

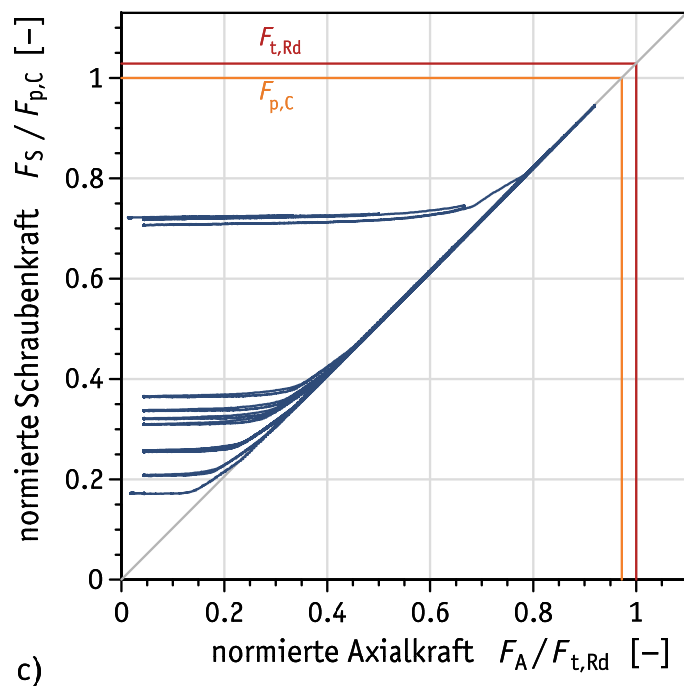
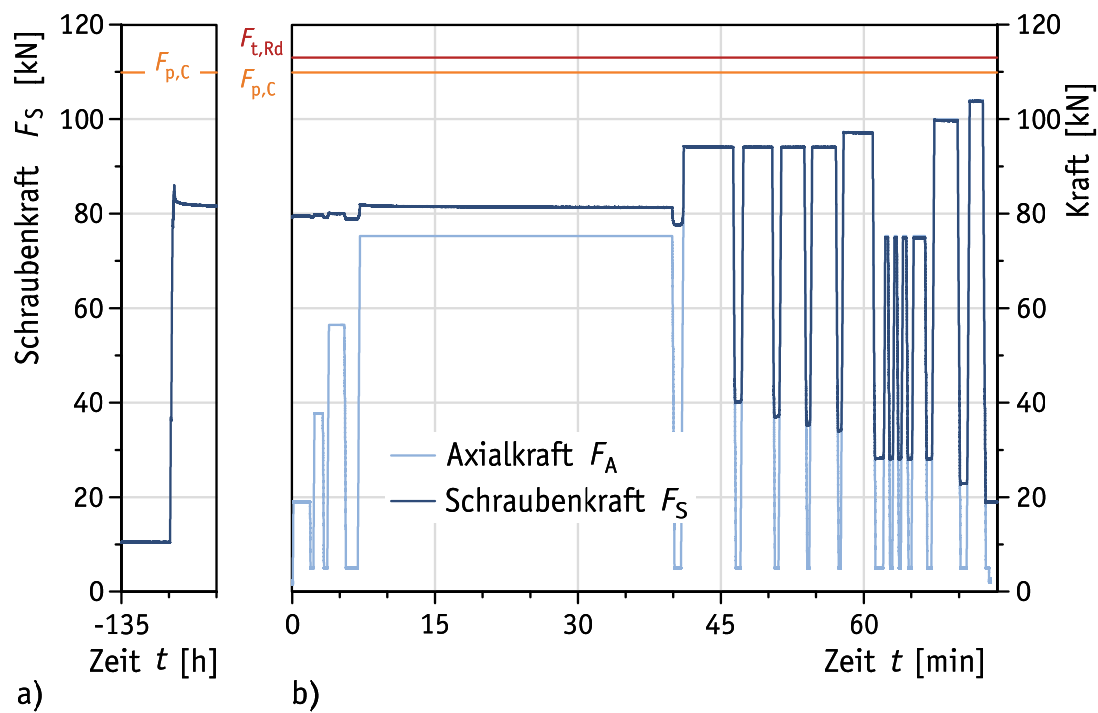
**Bild C.21.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z19 (ohne DTI)**Figure C.21.** Test results: component tensile test No. Z19 (without DTI)

**Tabelle C.32.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z19 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.32.** Test results: component tensile test No. Z19 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,c}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,c}$ [-]
M16 × 100 – 78 – Shr008 – H8 – Vgl – Z19															
M	M			89,0			0,00	0,98	1,01	M			89,0	0,98	1,01
0	0		0,0	87,8			0,00	0,97	1,00	1	-0,3	0,0	87,8	0,97	1,00
1	2	0,4	15,1	88,1	5,85		0,17	0,97	1,00	3	1,5	4,9	87,9	0,97	1,00
2	4	1,8	30,0	88,6	2,95		0,33	0,98	1,01	5	3,0	4,9	87,8	0,97	1,00
3	6	3,2	45,0	89,1	1,98		0,50	0,99	1,01	7	4,5	4,9	87,8	0,97	1,00
4	8	4,8	60,0	89,7	1,50		0,66	0,99	1,02	9	36,1	4,9	87,6	0,97	1,00
5	10	36,5	75,0	91,2	1,22		0,83	1,01	1,04	11	37,8	4,9	87,4	0,97	0,99
6	12	38,2	75,0	91,2	1,22		0,83	1,01	1,04	13	39,5	4,9	87,4	0,97	0,99
7	14	39,9	75,0	91,1	1,21		0,83	1,01	1,04	15	41,3	4,9	87,3	0,97	0,99
8	16	41,6	75,0	91,0	1,21		0,83	1,01	1,03	17	43,0	4,9	87,2	0,96	0,99
9	18	43,4	77,5	91,5	1,18		0,86	1,01	1,04	19	44,8	4,9	87,2	0,96	0,99
10	20	45,1	80,0	92,1	1,15		0,88	1,02	1,05	21	46,5	4,9	87,1	0,96	0,99
11	22	46,9	82,5	92,7	1,12		0,91	1,02	1,05	23	48,3	4,9	87,0	0,96	0,99
12	24	48,6	85,0	93,3	1,10		0,94	1,03	1,06	25	50,1	4,9	86,9	0,96	0,99
13	26	50,4	87,5	94,2	1,08		0,97	1,04	1,07	27	51,8	4,9	86,9	0,96	0,99
14	28	52,3	90,0	95,3	1,06		0,99	1,05	1,08	29	53,7	4,9	86,6	0,96	0,98
15	30	54,1	90,0	95,3	1,06		0,99	1,05	1,08	31	55,5	4,9	86,6	0,96	0,98
16	32	55,9	90,0	95,2	1,06		0,99	1,05	1,08	33	57,3	4,9	86,4	0,96	0,98
17	34	57,8	90,0	95,3	1,06		0,99	1,05	1,08	35	59,2	4,9	86,4	0,96	0,98
18	36	59,6	90,0	95,2	1,06		1,00	1,05	1,08	37	60,9	4,9	86,4	0,96	0,98
19	38	61,4	90,0	95,1	1,06		0,99	1,05	1,08	39	62,8	4,9	86,4	0,96	0,98
20	40	63,2	90,0	95,1	1,06		0,99	1,05	1,08	41	64,6	4,9	86,3	0,95	0,98


**M16 × 100 – 80 – Shr018 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 1 – Z20**

Shr.HV | Shb.HB | DTI.H10 | 69 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.22.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z20 (mit DTI)

**Figure C.22.** Test results: component tensile test No. Z20 (including DTI)

**Tabelle C.33.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z20 (mit DTI) – Anziehen**Table C.33.** Test results: component tensile test No. Z20 (including DTI) – tightening

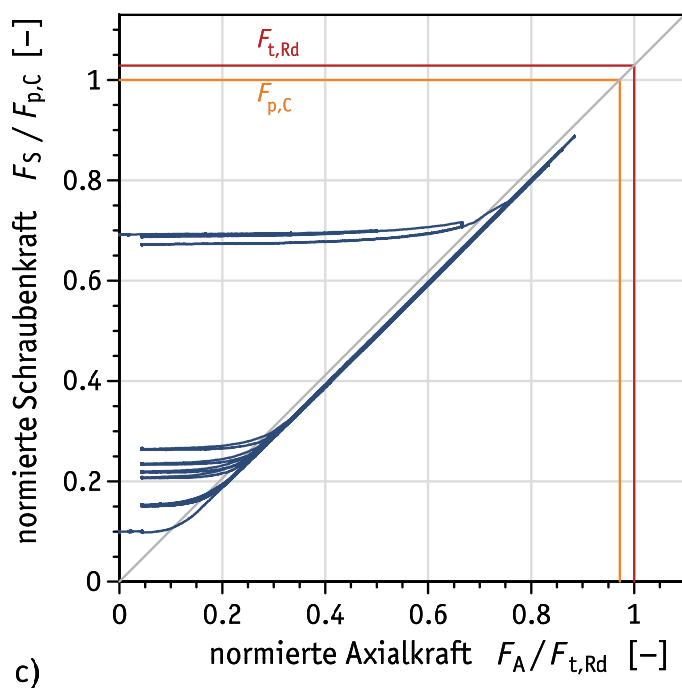
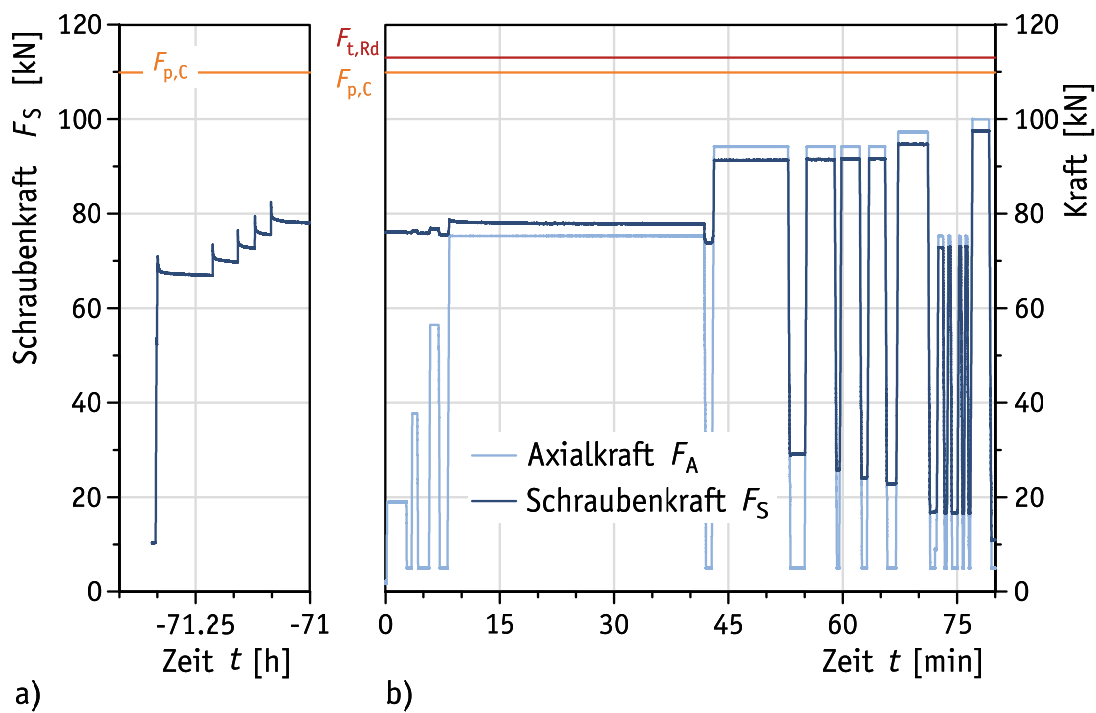
M16 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 1 – Z20			
$F_S$	[kN]	86	
$F_S / F_{ub}$	[-]	0,55	
$F_S / F_{p,C}$	[-]	0,78	
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,25
		2	0,3
		3	0,4
		4	0,2
Fühllehre	[mm]	0,40	
$n_{refusal}$	[-]	3	
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,3
$R/2$	[mm]		±0,13

**Tabelle C.34.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z20 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.34.** Test results: component tensile test No. Z20 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 100 – 80 – Shr018 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 1 – Z20															
M	M			86,0			0,00	0,76	0,78	M			86,0	0,76	0,78
0	0		0,1	79,3			0,00	0,70	0,72	1	-0,2	0,1	79,3	0,70	0,72
1	2	0,1	19,0	79,5	4,19		0,17	0,70	0,72	3	2,1	4,9	79,3	0,70	0,72
2	4	2,3	37,7	79,8	2,12		0,33	0,71	0,73	5	3,5	4,9	79,2	0,70	0,72
3	6	3,9	56,5	80,2	1,42		0,50	0,71	0,73	7	6,3	4,9	78,9	0,70	0,72
4	8	7,1	75,3	82,0	1,09		0,67	0,73	0,75	9	40,5	4,9	77,6	0,69	0,71
5	10	41,1	94,2	94,3	1,00	=	0,83	0,83	0,86	11	46,8	4,9	40,1	0,36	0,37
6	12	47,4	94,2	94,0	1,00	=	0,83	0,83	0,86	13	50,9	4,9	37,0	0,33	0,34
7	14	51,4	94,2	94,0	1,00	=	0,83	0,83	0,86	15	54,2	4,9	35,3	0,31	0,32
8	16	54,6	94,2	94,0	1,00	=	0,83	0,83	0,86	17	57,5	4,9	34,1	0,30	0,31
9	18	57,9	97,3	97,2	1,00	=	0,86	0,86	0,88	19	61,6	4,9	28,3	0,25	0,26
10	20	62,3	75,3	74,9	1,00	=	0,67	0,66	0,68	21	62,9	4,9	28,1	0,25	0,26
11	22	63,2	75,3	74,9	1,00	=	0,67	0,66	0,68	23	63,8	4,9	28,1	0,25	0,26
12	24	64,1	75,3	74,9	1,00	=	0,67	0,66	0,68	25	64,9	4,9	28,1	0,25	0,26
13	26	65,2	75,3	74,9	1,00	=	0,67	0,66	0,68	27	66,9	4,9	28,0	0,25	0,26
14	28	67,4	100,0	99,9	1,00	=	0,88	0,88	0,91	29	70,5	4,9	22,9	0,20	0,21
15	30	71,1	104,0	103,7	1,00	=	0,92	0,92	0,94	31	73,3	2,0	18,9	0,17	0,17

**M16 × 90 – 70 – Shr061 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 2 – Z21**




Shr.HV | Shb.HB | DTI.H10 | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.23.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z21 (mit DTI)

**Figure C.23.** Test results: component tensile test No. Z21 (including DTI)



**Tabelle C.35.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z21 (mit DTI) – Anziehen**Table C.35.** Test results: component tensile test No. Z21 (including DTI) – tightening

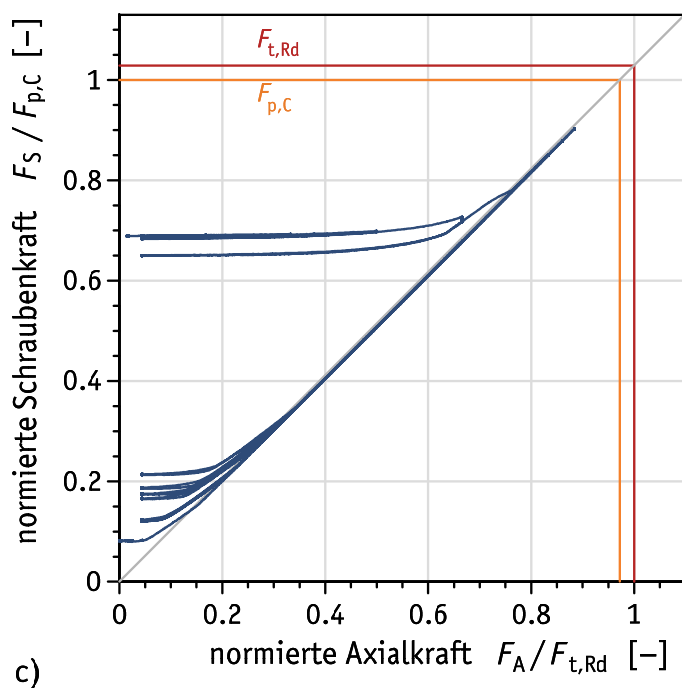
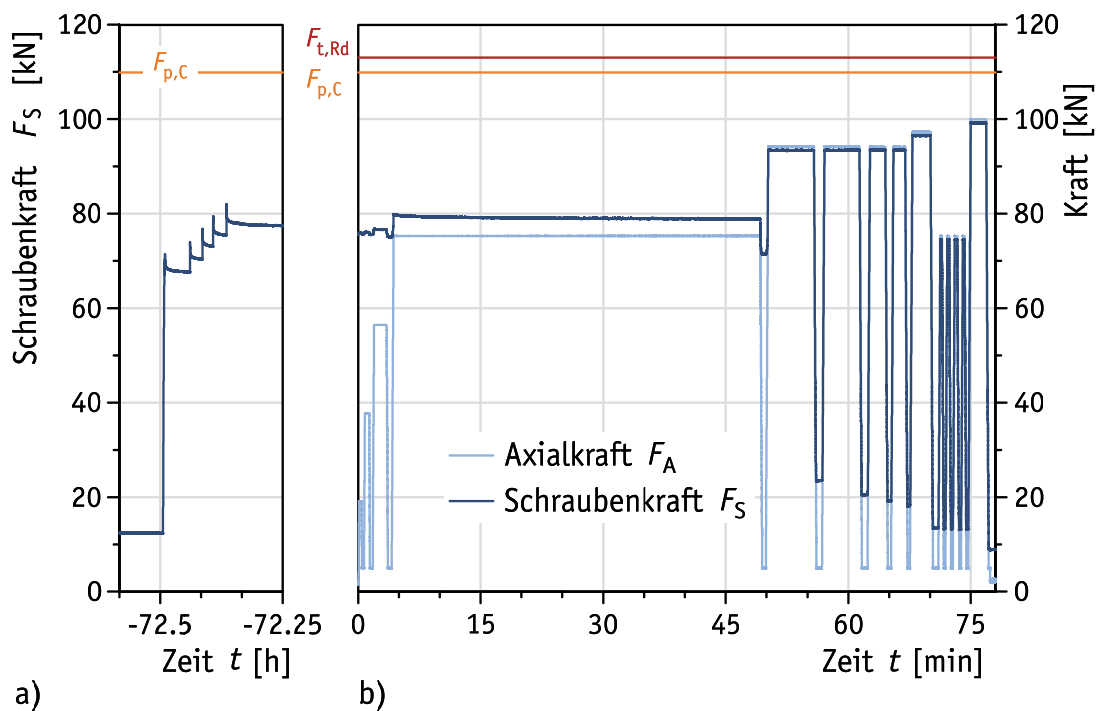
M16 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 2 – Z21							
$F_S$	[kN]		71	73	77	80	82
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,45	0,47	0,49	0,51	0,53
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,65	0,67	0,7	0,72	0,75
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,5	0,5	0,4	0,35	0,32
		2	0,5	0,45	0,4	0,35	0,32
		3	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4
		4	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35
Fühllehre	[mm]	0,40					
$n_{refusal}$	[-]		0	0	0	2	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,56	0,53	0,46	0,41	0,37
$R / 2$	[mm]		±0,08	±0,08	±0,08	±0,08	±0,07

**Tabelle C.36.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z21 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.36.** Test results: component tensile test No. Z21 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]	=	[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 90 – 70 – Shr061 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 2 – Z21															
M	M			82,5			0,00	0,73	0,75	M			82,5	0,73	0,75
0	0		0,0	76,0			0,00	0,67	0,69	1	-0,3	0,0	76,0	0,67	0,69
1	2	0,2	19,0	76,2	4,01		0,17	0,67	0,69	3	3,1	4,9	76,0	0,67	0,69
2	4	3,5	37,7	76,3	2,03		0,33	0,68	0,69	5	5,0	4,9	75,8	0,67	0,69
3	6	5,9	56,5	77,0	1,36		0,50	0,68	0,70	7	7,7	4,9	75,6	0,67	0,69
4	8	8,4	75,3	78,7	1,05		0,67	0,70	0,72	9	42,4	4,9	73,8	0,65	0,67
5	10	43,1	94,2	91,3	0,97	=	0,83	0,81	0,83	11	54,0	4,9	29,2	0,26	0,27
6	12	55,3	94,2	91,6	0,97	=	0,83	0,81	0,83	13	59,3	4,9	25,8	0,23	0,23
7	14	59,8	94,2	91,6	0,97	=	0,83	0,81	0,83	15	62,8	4,9	24,1	0,21	0,22
8	16	63,5	94,2	91,7	0,97	=	0,83	0,81	0,83	17	66,3	4,9	22,8	0,20	0,21
9	18	67,3	97,3	94,8	0,97	=	0,86	0,84	0,86	19	71,9	4,9	16,8	0,15	0,15
10	20	72,6	75,3	72,9	0,97	=	0,67	0,65	0,66	21	73,5	4,9	16,7	0,15	0,15
11	22	73,9	75,3	72,9	0,97	=	0,67	0,64	0,66	23	74,7	4,9	16,7	0,15	0,15
12	24	75,3	75,3	72,9	0,97	=	0,67	0,64	0,66	25	75,8	4,9	16,6	0,15	0,15
13	26	76,1	75,3	73,0	0,97	=	0,67	0,65	0,66	27	76,6	4,9	16,6	0,15	0,15
14	28	77,0	100,0	97,6	0,98	=	0,88	0,86	0,89	29	80,0	4,9	11,0	0,10	0,10

**M16 × 90 – 70 – Shr062 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 3 – Z22**

Shr.HV | Shb.HB | DTI.H10 | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.24.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z22 (mit DTI)

**Figure C.24.** Test results: component tensile test No. Z22 (including DTI)

**Tabelle C.37.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z22 (mit DTI) – Anziehen**Table C.37.** Test results: component tensile test No. Z22 (including DTI) – tightening

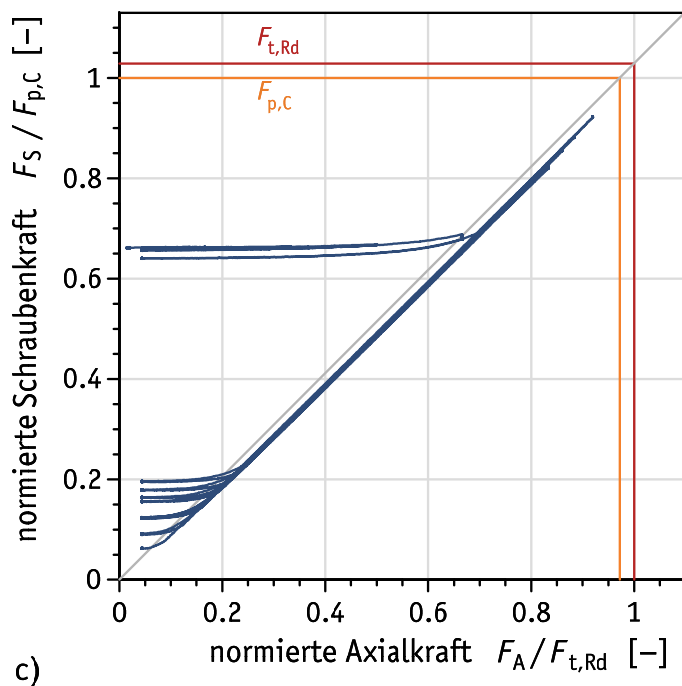
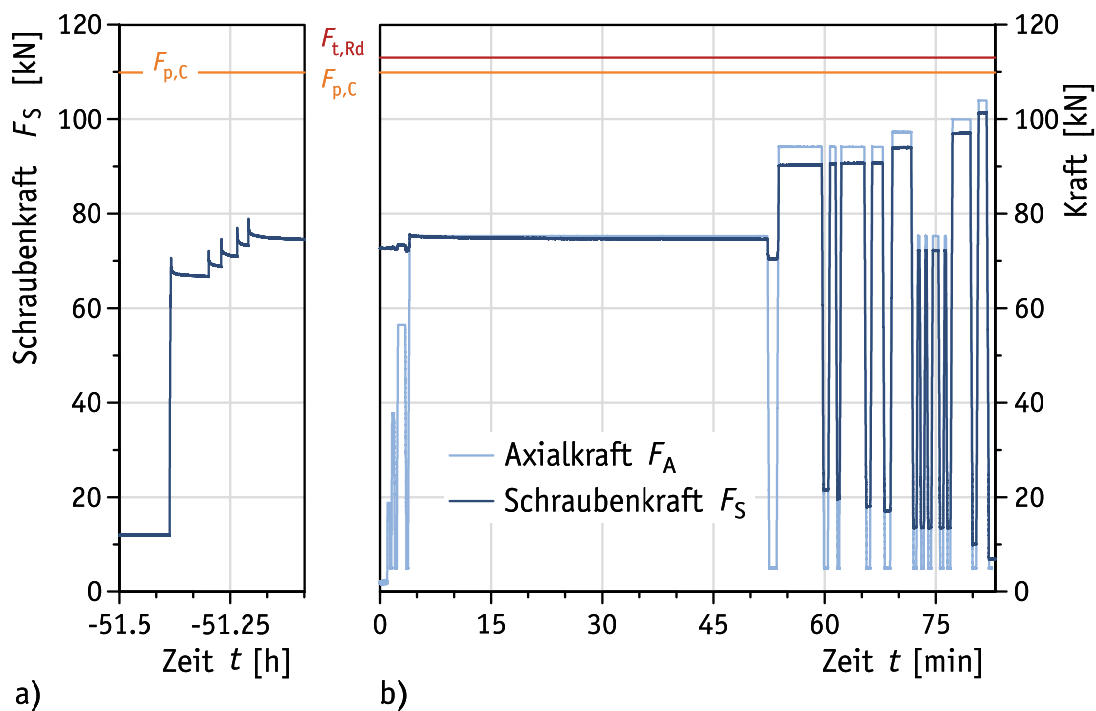
M16 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 3 – Z22							
$F_S$	[kN]		71	74	77	79	82
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,46	0,47	0,49	0,51	0,52
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,65	0,67	0,7	0,72	0,75
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3
		2	0,55	0,5	0,4	0,4	0,35
		3	0,5	0,5	0,45	0,4	0,4
		4	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3
Fühllehre	[mm]	0,40					
$n_{refusal}$	[-]		0	0	0	2	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,54	0,5	0,44	0,4	0,36
$R / 2$	[mm]		±0,05	±0,05	±0,05	±0,05	±0,08

**Tabelle C.38.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z22 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.38.** Test results: component tensile test No. Z22 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 90 – 70 – Shr062 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 3 – Z22															
M	M			82,0			0,00	0,73	0,75	M			82,0	0,73	0,75
0	0		0,0	75,7			0,00	0,67	0,69	1	-0,3	0,0	75,7	0,67	0,69
1	2	0,1	19,0	75,8	4,00		0,17	0,67	0,69	3	0,6	4,9	75,7	0,67	0,69
2	4	0,8	37,7	76,1	2,02		0,33	0,67	0,69	5	1,6	4,9	75,5	0,67	0,69
3	6	2,0	56,5	76,8	1,36		0,50	0,68	0,70	7	3,9	4,9	75,1	0,66	0,68
4	8	4,4	75,3	79,9	1,06		0,67	0,71	0,73	9	49,7	4,9	71,4	0,63	0,65
5	10	50,2	94,2	93,4	0,99	=	0,83	0,83	0,85	11	56,4	4,9	23,5	0,21	0,21
6	12	57,1	94,2	93,4	0,99	=	0,83	0,83	0,85	13	61,9	4,9	20,5	0,18	0,19
7	14	62,6	94,2	93,5	0,99	=	0,83	0,83	0,85	15	65,0	4,9	19,2	0,17	0,17
8	16	65,5	94,2	93,4	0,99	=	0,83	0,83	0,85	17	67,4	4,9	18,3	0,16	0,17
9	18	67,8	97,3	96,5	0,99	=	0,86	0,85	0,88	19	70,7	4,9	13,5	0,12	0,12
10	20	71,3	75,3	74,5	0,99	=	0,67	0,66	0,68	21	71,7	4,9	13,3	0,12	0,12
11	22	72,1	75,3	74,6	0,99	=	0,67	0,66	0,68	23	72,6	4,9	13,2	0,12	0,12
12	24	73,0	75,3	74,4	0,99	=	0,67	0,66	0,68	25	73,6	4,9	13,3	0,12	0,12
13	26	74,0	75,3	74,5	0,99	=	0,67	0,66	0,68	27	74,5	4,9	13,2	0,12	0,12
14	28	75,0	100,0	99,3	0,99	=	0,88	0,88	0,90	29	79,9	0,0	9,0	0,08	0,08






**M16 × 90 – 70 – Shr061 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 5 – Z23**

Shr.HV | Shb.HB | DTI.H10 | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.25.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z23 (mit DTI)

**Figure C.25.** Test results: component tensile test No. Z23 (including DTI)

**Tabelle C.39.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z23 (mit DTI) – Anziehen**Table C.39.** Test results: component tensile test No. Z23 (including DTI) – tightening

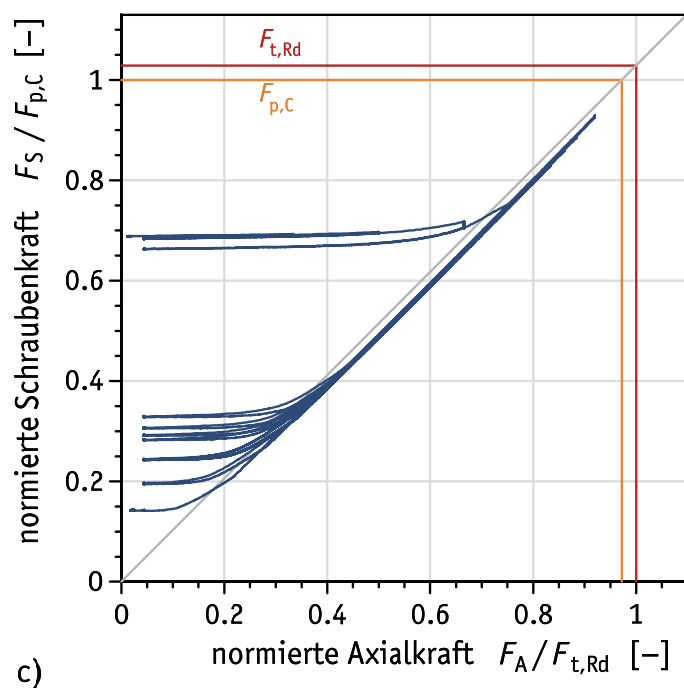
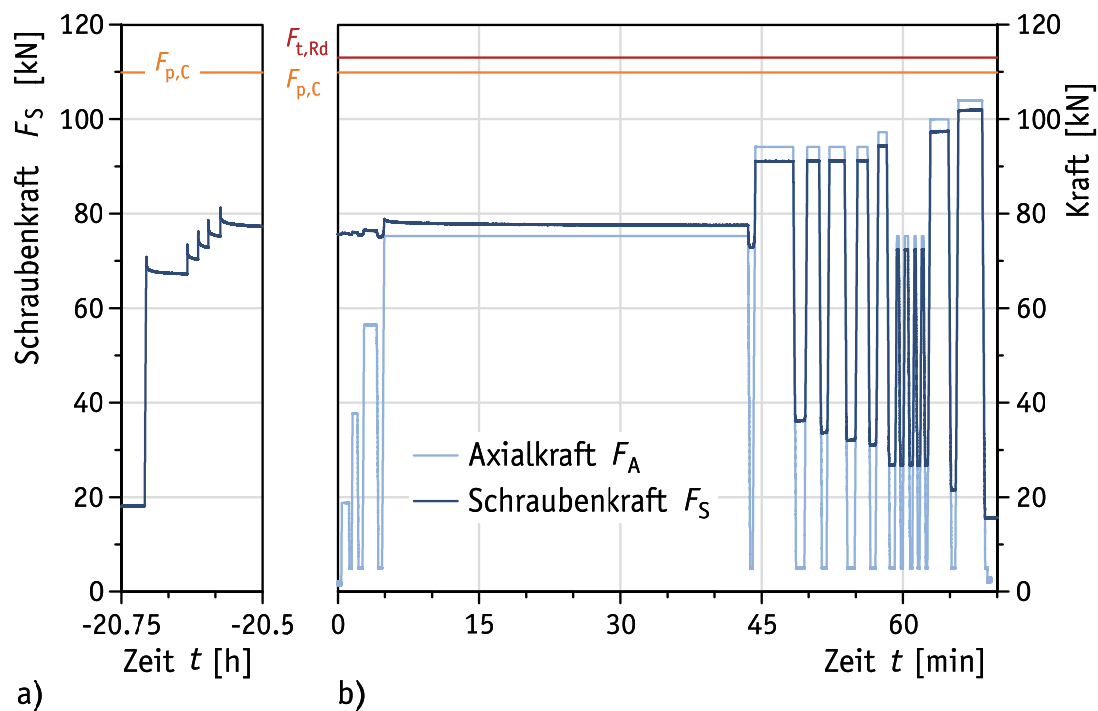
M16 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 5 – Z23							
$F_S$	[kN]		71	72	75	77	79
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,45	0,46	0,48	0,49	0,5
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,64	0,66	0,68	0,7	0,72
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,45	0,4	0,4	0,35	0,3
		2	0,35	0,32	0,25	0,22	0,18
		3	0,5	0,45	0,4	0,4	0,35
		4	0,55	0,55	0,5	0,45	0,4
Fühllehre	[mm]	0,40					
$n_{refusal}$	[-]		1	1	1	2	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,49	0,45	0,41	0,38	0,33
$R / 2$	[mm]		±0,13	±0,14	±0,15	±0,14	±0,14

**Tabelle C.40.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z23 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.40.** Test results: component tensile test No. Z23 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 90 – 70 – Shr061 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 5 – Z23															
M	M			79,0			0,00	0,70	0,72	M			79,0	0,70	0,72
0	0		1,6	72,7			0,01	0,64	0,66	1	0,0	1,6	72,7	0,64	0,66
1	2	1,0	18,8	72,9	3,88		0,17	0,64	0,66	3	1,5	4,9	72,6	0,64	0,66
2	4	1,7	37,7	72,9	1,94		0,33	0,65	0,66	5	2,1	4,9	72,5	0,64	0,66
3	6	2,5	56,5	73,5	1,30		0,50	0,65	0,67	7	3,7	4,9	72,1	0,64	0,66
4	8	4,0	75,3	75,6	1,00		0,67	0,67	0,69	9	53,0	4,9	70,3	0,62	0,64
5	10	53,8	94,2	90,0	0,96	=	0,83	0,80	0,82	11	60,1	4,9	21,5	0,19	0,20
6	12	60,7	94,2	90,6	0,96	=	0,83	0,80	0,82	13	61,9	4,9	19,6	0,17	0,18
7	14	62,3	94,2	90,6	0,96	=	0,83	0,80	0,82	15	65,9	4,9	18,0	0,16	0,16
8	16	66,4	94,2	90,7	0,96	=	0,83	0,80	0,82	17	68,5	4,9	17,1	0,15	0,16
9	18	69,2	97,3	93,9	0,97	=	0,86	0,83	0,85	19	72,2	4,9	13,5	0,12	0,12
10	20	72,6	75,3	72,2	0,96	=	0,67	0,64	0,66	21	73,2	4,9	13,6	0,12	0,12
11	22	73,6	75,3	72,2	0,96	=	0,67	0,64	0,66	23	74,2	4,8	13,5	0,12	0,12
12	24	74,6	75,3	72,2	0,96	=	0,67	0,64	0,66	25	75,8	4,9	13,5	0,12	0,12
13	26	76,2	75,3	72,2	0,96	=	0,67	0,64	0,66	27	76,8	4,9	13,6	0,12	0,12
14	28	77,3	100,0	96,8	0,97	=	0,88	0,86	0,88	29	80,2	4,9	10,1	0,09	0,09
15	30	80,8	104,0	101,1	0,97	=	0,92	0,89	0,92	31	82,5	5,1	6,9	0,06	0,06

**M16 × 100 – 80 – Shr018 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 6 – Z24**

Shr.HV | Shb.HB | DTI.H10 | 69 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.26.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z24 (mit DTI)

**Figure C.26.** Test results: component tensile test No. Z24 (including DTI)

**Tabelle C.41.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z24 (mit DTI) – Anziehen**Table C.41.** Test results: component tensile test No. Z24 (including DTI) – tightening

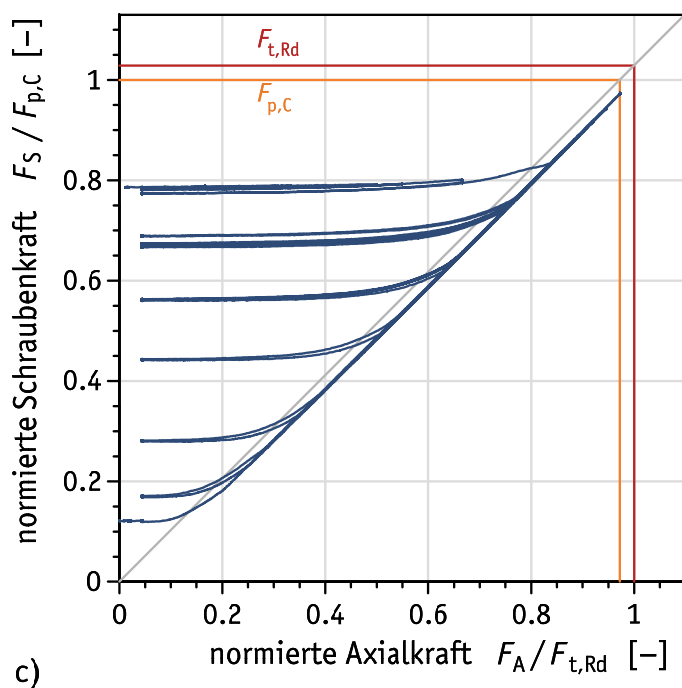
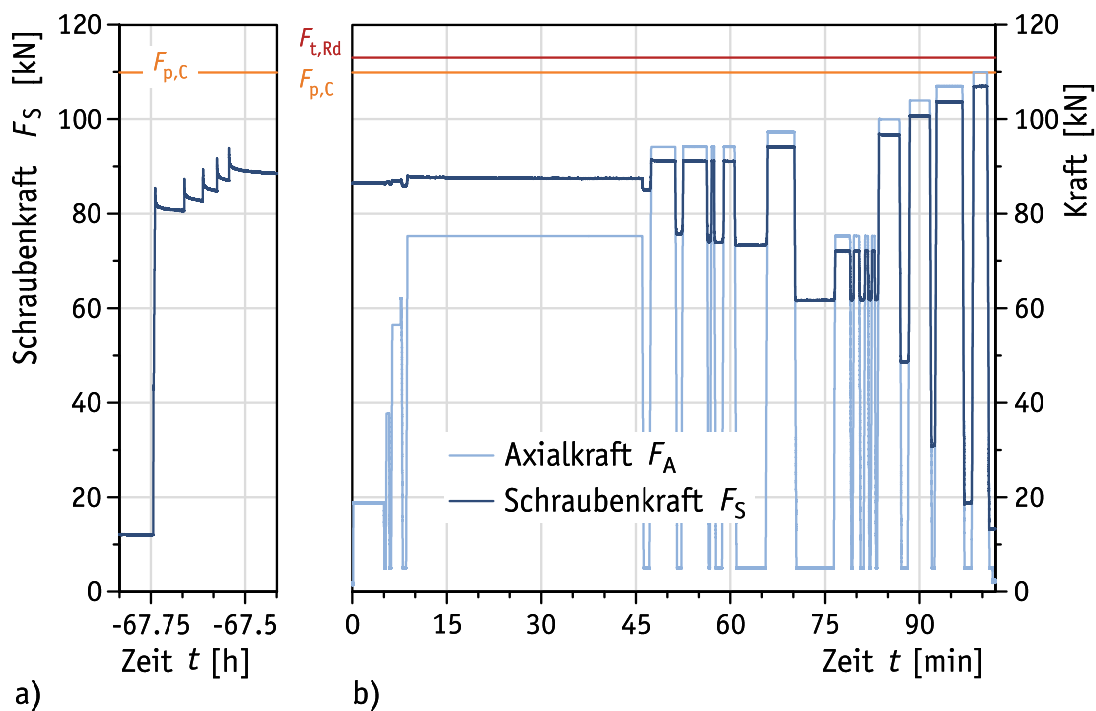
M16 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 6 – Z24							
$F_S$	[kN]		71	73	76	79	81
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,45	0,47	0,49	0,5	0,52
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,65	0,67	0,69	0,72	0,74
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35
		2	0,4	0,35	0,32	0,3	0,25
		3	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35
		4	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35
Fühllehre	[mm]	0,40					
$n_{refusal}$	[-]		0	1	1	1	4
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,54	0,49	0,44	0,4	0,35
$R / 2$	[mm]		±0,1	±0,1	±0,09	±0,08	±0,08

**Tabelle C.42.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z24 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.42.** Test results: component tensile test No. Z24 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]	=	[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 100 – 80 – Shr018 – H10 – TS-A10 – Shr.fix – 6 – Z24															
M	M			81,3			0,00	0,72	0,74	M			81,3	0,72	0,74
0	0		0,0	75,6			0,00	0,67	0,69	1	-0,4	0,0	75,6	0,67	0,69
1	2	0,4	18,8	75,9	4,04		0,17	0,67	0,69	3	1,4	4,9	75,6	0,67	0,69
2	4	1,6	37,7	76,1	2,02		0,33	0,67	0,69	5	2,4	4,9	75,5	0,67	0,69
3	6	2,8	56,5	76,5	1,36		0,50	0,68	0,70	7	4,5	4,9	75,1	0,66	0,68
4	8	4,9	75,3	78,9	1,05		0,67	0,70	0,72	9	43,9	4,9	72,9	0,64	0,66
5	10	44,3	94,2	91,1	0,97	=	0,83	0,81	0,83	11	49,1	4,9	36,2	0,32	0,33
6	12	49,8	94,2	91,2	0,97	=	0,83	0,81	0,83	13	51,6	4,9	33,7	0,30	0,31
7	14	52,2	94,1	91,2	0,97	=	0,83	0,81	0,83	15	54,5	4,9	32,1	0,28	0,29
8	16	55,2	94,2	91,2	0,97	=	0,83	0,81	0,83	17	56,9	4,9	31,1	0,27	0,28
9	18	57,4	97,2	94,3	0,97	=	0,86	0,83	0,86	19	58,9	4,9	26,8	0,24	0,24
10	20	59,4	75,3	72,3	0,96	=	0,67	0,64	0,66	21	59,9	4,9	26,7	0,24	0,24
11	22	60,2	75,3	72,4	0,96	=	0,67	0,64	0,66	23	60,9	4,9	26,8	0,24	0,24
12	24	61,2	75,3	72,3	0,96	=	0,67	0,64	0,66	25	61,7	4,9	26,7	0,24	0,24
13	26	62,0	75,3	72,4	0,96	=	0,67	0,64	0,66	27	62,5	4,9	26,7	0,24	0,24
14	28	62,9	99,9	97,2	0,97	=	0,88	0,86	0,88	29	65,3	4,9	21,5	0,19	0,20
15	30	65,9	103,9	101,6	0,98	=	0,92	0,90	0,92	31	69,1	2,1	15,6	0,14	0,14

**M16 × 90 – 70 – Shr061 – H10 – TS-A11 – Shr.fix – 6 – Z25**








Shr.HV | Shb.HB | DTI.H10 | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.27.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z25 (mit DTI)

**Figure C.27.** Test results: component tensile test No. Z25 (including DTI)



**Tabelle C.43.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z25 (mit DTI) – Anziehen**Table C.43.** Test results: component tensile test No. Z25 (including DTI) – tightening

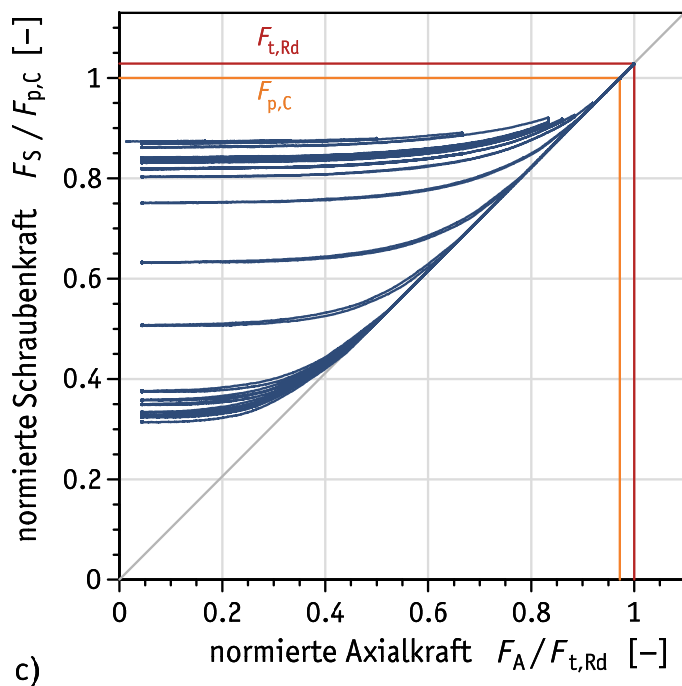
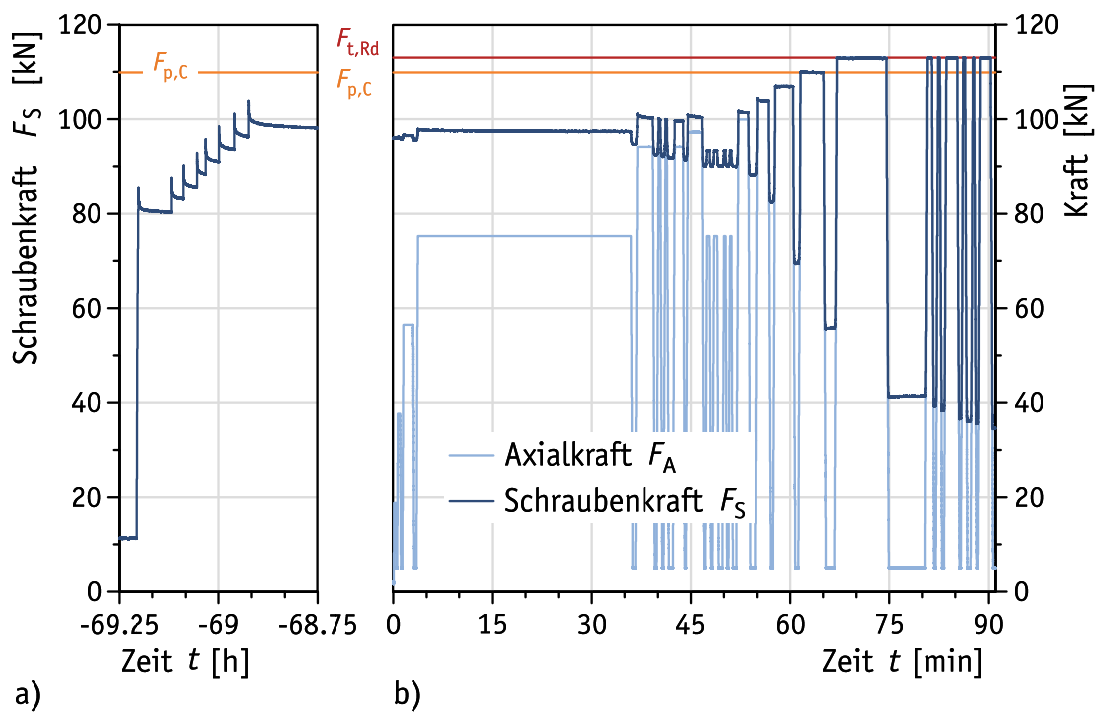
M16 – H10 – TS-A11 – Shr.fix – 6 – Z25							
$F_S$	[kN]		85	87	89	92	94
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,54	0,56	0,57	0,58	0,6
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,78	0,79	0,81	0,83	0,85
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,55	0,55	0,5	0,45	0,4
		2	0,5	0,45	0,4	0,4	0,32
		3	0,5	0,45	0,4	0,4	0,32
		4	0,5	0,5	0,45	0,4	0,35
Fühllehre	[mm]	0,40					
$n_{refusal}$	[-]		0	0	0	0	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,54	0,51	0,46	0,44	0,37
$R / 2$	[mm]		±0,05	±0,08	±0,08	±0,05	±0,07

**Tabelle C.44.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z25 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.44.** Test results: component tensile test No. Z25 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]	=	[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 90 – 70 – Shr.061 – H10 – TS-A11 – Shr.fix – 6 – Z25															
M	M			93,9			0,00	0,83	0,85	M			93,9	0,83	0,85
0	0		0,0	86,4			0,00	0,76	0,79	1	-0,3	0,0	86,4	0,76	0,79
1	2	0,2	18,8	86,5	4,61		0,17	0,77	0,79	3	5,2	4,9	86,3	0,76	0,79
2	4	5,4	37,7	86,7	2,30		0,33	0,77	0,79	5	6,1	4,9	86,2	0,76	0,78
3	6	6,3	56,5	87,0	1,54		0,50	0,77	0,79	7	8,3	4,9	85,8	0,76	0,78
4	8	8,8	75,3	88,1	1,17		0,67	0,78	0,80	9	46,7	4,9	84,9	0,75	0,77
5	10	47,4	94,2	91,5	0,97	=	0,83	0,81	0,83	11	51,9	4,9	75,6	0,67	0,69
6	12	52,5	94,2	91,1	0,97	=	0,83	0,81	0,83	13	56,6	4,9	74,1	0,66	0,67
7	14	57,0	94,2	91,1	0,97	=	0,83	0,81	0,83	15	58,1	4,9	73,9	0,65	0,67
8	16	59,0	94,2	91,2	0,97	=	0,83	0,81	0,83	17	63,3	4,9	73,3	0,65	0,67
9	18	65,9	97,3	94,3	0,97	=	0,86	0,83	0,86	19	73,6	4,9	61,6	0,55	0,56
10	20	76,6	75,3	72,0	0,96	=	0,67	0,64	0,66	21	79,2	4,9	61,8	0,55	0,56
11	22	79,6	75,3	72,0	0,96	=	0,67	0,64	0,66	23	80,8	4,9	61,7	0,55	0,56
12	24	81,4	75,3	72,1	0,96	=	0,67	0,64	0,66	25	82,1	4,9	61,8	0,55	0,56
13	26	82,5	75,3	72,1	0,96	=	0,67	0,64	0,66	27	83,2	4,9	61,8	0,55	0,56
14	28	83,6	100,0	96,8	0,97	=	0,88	0,86	0,88	29	87,7	4,9	48,7	0,43	0,44
15	30	88,5	104,0	100,7	0,97	=	0,92	0,89	0,92	31	92,1	4,9	30,8	0,27	0,28
16	32	92,7	107,0	103,7	0,97	=	0,95	0,92	0,94	33	97,6	4,9	18,8	0,17	0,17
17	34	98,6	110,0	106,9	0,97	=	0,97	0,95	0,97	35	103,1	0,1	13,3	0,12	0,12







**M16 × 90 – 70 – Shr062 – H10 – TS-A11 – Shr.fix – 7 – Z26**

Shr.HV | Shb.HB | DTI.H10 | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.28.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z26 (mit DTI)

**Figure C.28.** Test results: component tensile test No. Z26 (including DTI)

**Tabelle C.45.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z26 (mit DTI) – Anziehen**Table C.45.** Test results: component tensile test No. Z26 (including DTI) – tightening

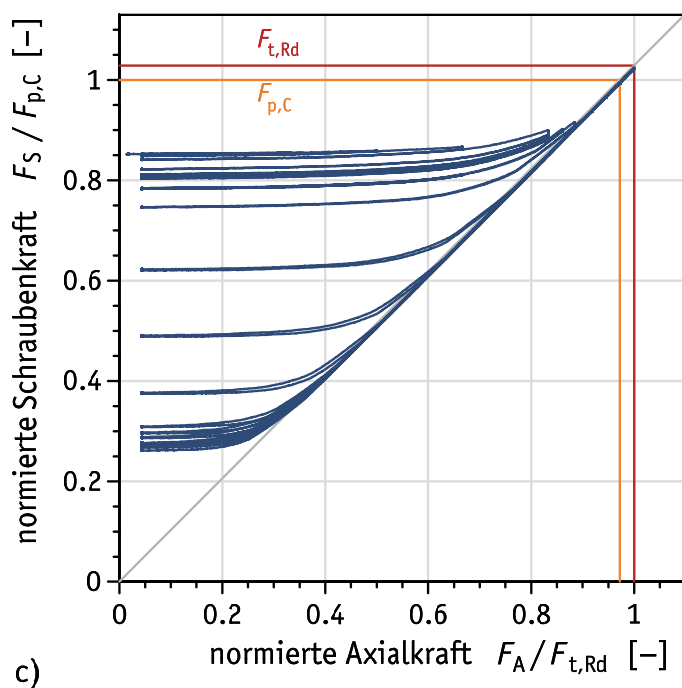
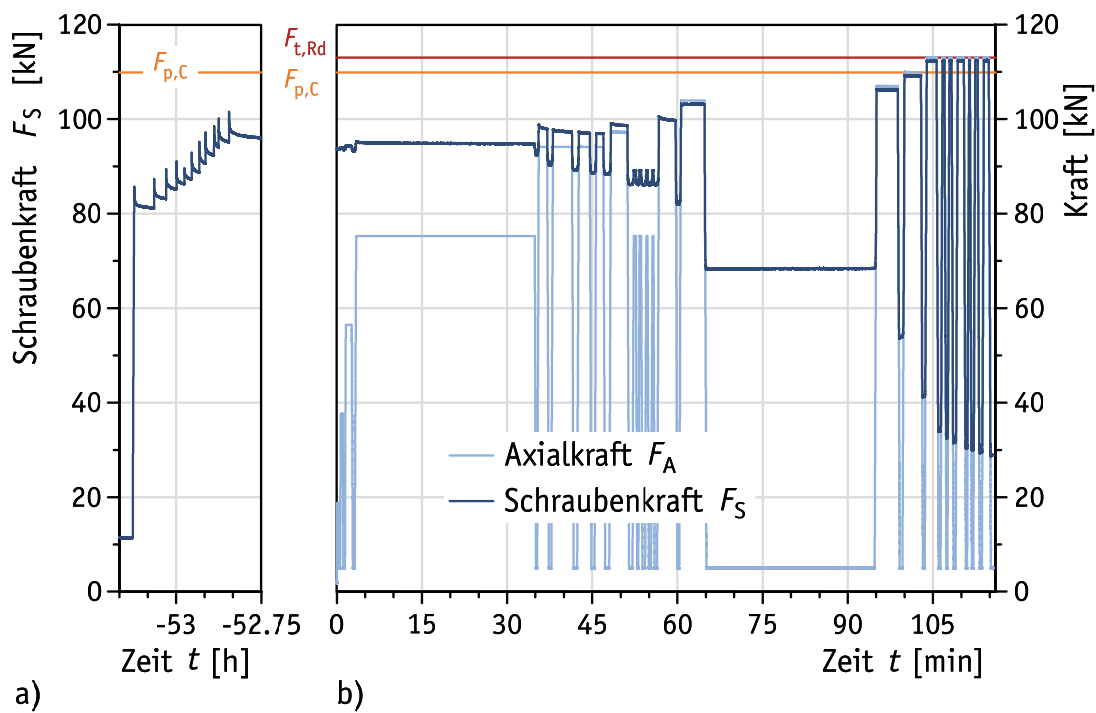
M16 – H10 – TS-A11 – Shr.fix – 7 – Z26										
$F_S$	[kN]		86	88	90	93	96	98	101	104
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,54	0,56	0,57	0,59	0,61	0,63	0,64	0,66
$F_S / F_{p,C}$	[-]		0,78	0,8	0,82	0,84	0,87	0,9	0,92	0,95
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,7	0,65	0,6	0,55	0,55	0,5	0,45	0,4
		2	0,6	0,6	0,55	0,5	0,5	0,4	0,4	0,32
		3	0,5	0,45	0,4	0,35	0,32	0,25	0,22	0,15
		4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,32	0,3	0,25	0,2
Fühllehre	[mm]	0,40								
$n_{refusal}$	[-]		0	0	0	1	2	2	2	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,6	0,58	0,51	0,48	0,44	0,38	0,35	0,28
$R / 2$	[mm]		±0,13	±0,13	±0,13	±0,13	±0,14	±0,15	±0,14	±0,15

**Tabelle C.46.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z26 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.46.** Test results: component tensile test No. Z26 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]	=	[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 90 – 70 – Shr062 – H10 – TS-A11 – Shr.fix – 7 – Z26															
M	M			103,9			0,00	0,92	0,95	M			103,9	0,92	0,95
0	0		0,1	95,9			0,00	0,85	0,87	1	-0,1	0,1	95,9	0,85	0,87
1	2	0,2	18,8	96,1	5,11		0,17	0,85	0,87	3	0,5	4,9	96,0	0,85	0,87
2	4	0,7	37,7	96,2	2,55		0,33	0,85	0,88	5	1,3	4,9	95,8	0,85	0,87
3	6	1,6	56,5	96,6	1,71		0,50	0,85	0,88	7	3,3	4,9	95,6	0,85	0,87
4	8	3,7	75,3	97,9	1,30		0,67	0,87	0,89	9	36,4	4,9	94,7	0,84	0,86
5	10	36,9	94,2	101,1	1,07		0,83	0,89	0,92	11	39,6	4,9	92,4	0,82	0,84
6	12	40,1	94,2	100,1	1,06		0,83	0,89	0,91	13	40,7	4,9	92,0	0,81	0,84
7	14	41,1	94,2	100,0	1,06		0,83	0,88	0,91	15	41,9	4,9	91,8	0,81	0,83
8	16	42,6	94,2	99,8	1,06		0,83	0,88	0,91	17	44,2	4,9	91,4	0,81	0,83
9	18	44,6	97,3	100,9	1,04		0,86	0,89	0,92	19	47,1	4,9	90,0	0,80	0,82
10	20	47,4	75,3	93,3	1,24		0,67	0,83	0,85	21	48,1	4,9	89,9	0,80	0,82
11	22	48,5	75,3	93,3	1,24		0,67	0,83	0,85	23	49,4	4,9	90,1	0,80	0,82
12	24	50,0	75,3	93,3	1,24		0,67	0,82	0,85	25	50,5	4,9	90,0	0,80	0,82
13	26	50,9	75,3	93,4	1,24		0,67	0,83	0,85	27	51,6	4,9	90,0	0,80	0,82
14	28	52,2	100,0	101,8	1,02		0,88	0,90	0,93	29	54,4	4,9	88,2	0,78	0,80
15	30	55,1	104,0	104,4	1,00		0,92	0,92	0,95	31	57,2	4,9	82,5	0,73	0,75
16	32	57,7	107,0	106,9	1,00	=	0,95	0,95	0,97	33	60,9	4,9	69,4	0,61	0,63
17	34	61,6	110,0	109,9	1,00	=	0,97	0,97	1,00	35	66,0	4,9	55,7	0,49	0,51
18	36	67,1	113,0	112,9	1,00	=	1,00	1,00	1,03	37	77,6	4,9	41,4	0,37	0,38
19	38	80,8	113,0	112,9	1,00	=	1,00	1,00	1,03	39	81,8	4,9	39,3	0,35	0,36
20	40	82,4	113,0	112,9	1,00	=	1,00	1,00	1,03	41	83,0	4,9	38,4	0,34	0,35
21	42	83,6	113,0	112,9	1,00	=	1,00	1,00	1,03	43	85,7	4,9	36,6	0,32	0,33
22	44	86,2	113,0	113,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	45	87,0	4,9	36,1	0,32	0,33
23	46	87,7	113,0	113,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	47	88,3	4,9	35,6	0,31	0,32
24	48	88,8	113,0	112,9	1,00	=	1,00	1,00	1,03	49	91,0	4,9	34,7	0,31	0,32














**M16 × 90 – 70 – Shr062 – H10 – TS-A11 – Shr.fix – 8 – Z27**

Shr.HV | Shb.HB | DTI.H10 | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.29.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z27 (mit DTI)

**Figure C.29.** Test results: component tensile test No. Z27 (including DTI)

**Tabelle C.47.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z27 (mit DTI) – Anziehen**Table C.47.** Test results: component tensile test No. Z27 (including DTI) – tightening

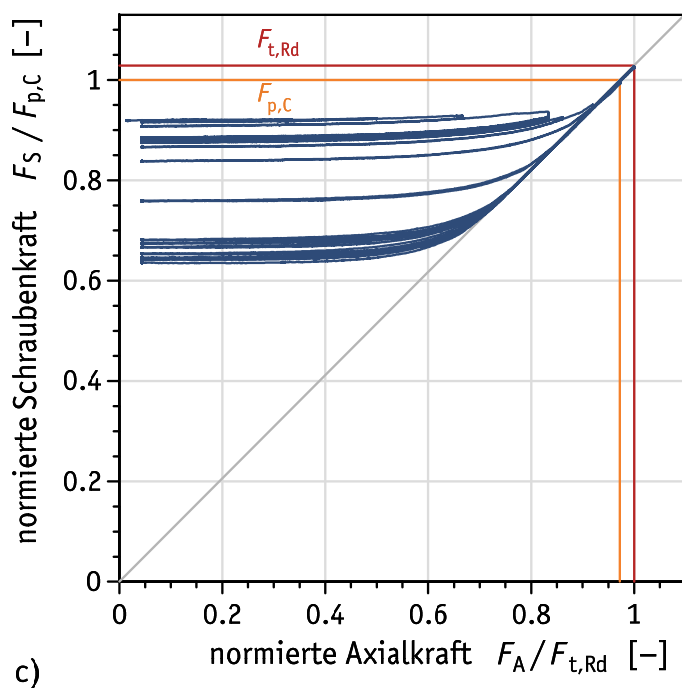
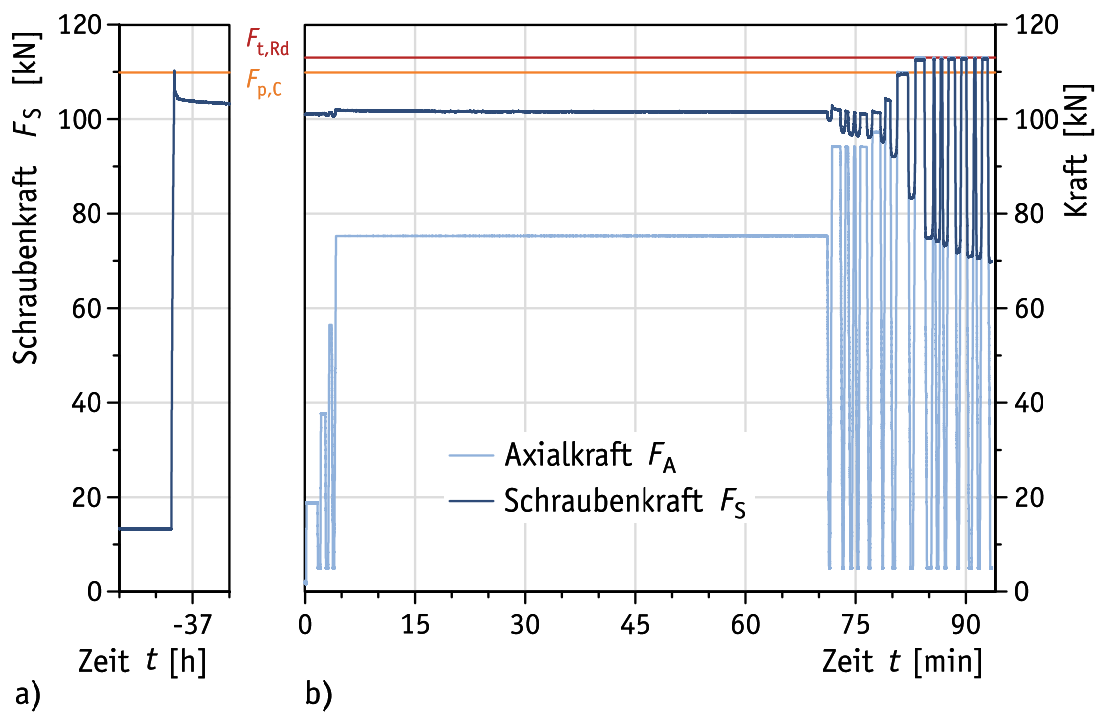
M16 – H10 – TS-A11 – Shr.fix – 8 – Z27													
$F_S$	[kN]		86	87	89	91	90	93	95	97	99	100	102
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,55	0,56	0,57	0,58	0,57	0,59	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,78	0,79	0,81	0,83	0,82	0,85	0,87	0,88	0,9	0,91	0,92
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,65	0,6	0,6	0,55	0,55	0,55	0,5	0,45	0,4	0,4	0,35
		2	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35	0,35	0,32	0,28	0,25	0,22	0,18
		3	0,6	0,55	0,45	0,4	0,4	0,35	0,32	0,3	0,28	0,25	0,22
		4	0,6	0,6	0,55	0,5	0,5	0,5	0,5	0,45	0,4	0,4	0,35
Fühllehre	[mm]	0,40											
$n_{refusal}$	[-]		0	0	0	0	1	2	2	2	2	2	4
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,63	0,59	0,54	0,49	0,48	0,46	0,43	0,39	0,35	0,34	0,29
$R / 2$	[mm]		±0,08	±0,08	±0,1	±0,1	±0,13	±0,13	±0,12	±0,11	±0,1	±0,12	±0,11

**Tabelle C.48.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z27 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.48.** Test results: component tensile test No. Z27 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 90 – 70 – Shr062 – H10 – TS-A11 – Shr.fix – 8 – Z27															
M	M			101,6			0,00	0,90	0,92	M			101,6	0,90	0,92
0	0		0,0	93,6			0,00	0,83	0,85	1	-0,3	0,0	93,6	0,83	0,85
1	2	0,1	18,8	93,8	4,99		0,17	0,83	0,85	3	0,5	4,9	93,6	0,83	0,85
2	4	0,7	37,7	94,0	2,49		0,33	0,83	0,86	5	1,3	4,9	93,5	0,83	0,85
3	6	1,6	56,5	94,4	1,67		0,50	0,84	0,86	7	3,0	4,9	93,3	0,83	0,85
4	8	3,4	75,3	95,3	1,27		0,67	0,84	0,87	9	35,2	4,9	92,4	0,82	0,84
5	10	35,6	94,2	98,9	1,05		0,83	0,87	0,90	11	37,6	4,9	90,4	0,80	0,82
6	12	38,1	94,2	97,7	1,04		0,83	0,86	0,89	13	42,1	4,9	89,2	0,79	0,81
7	14	42,6	94,1	97,3	1,03		0,83	0,86	0,89	15	45,1	4,9	88,7	0,78	0,81
8	16	45,7	94,2	96,9	1,03		0,83	0,86	0,88	17	47,6	4,9	88,4	0,78	0,80
9	18	48,3	97,2	99,1	1,02		0,86	0,88	0,90	19	51,8	4,9	86,1	0,76	0,78
10	20	52,3	75,3	89,2	1,18		0,67	0,79	0,81	21	53,0	4,9	86,1	0,76	0,78
11	22	53,3	75,3	89,1	1,18		0,67	0,79	0,81	23	54,0	4,9	86,1	0,76	0,78
12	24	54,5	75,3	89,1	1,18		0,67	0,79	0,81	25	55,1	4,9	86,0	0,76	0,78
13	26	55,6	75,3	89,2	1,18		0,67	0,79	0,81	27	56,2	4,9	86,1	0,76	0,78
14	28	56,8	99,9	100,6	1,01		0,88	0,89	0,92	29	60,2	4,9	82,0	0,73	0,75
15	30	60,6	103,9	103,2	0,99	=	0,92	0,91	0,94	31	80,7	4,9	68,3	0,60	0,62
16	32	95,1	106,9	106,2	0,99	=	0,95	0,94	0,97	33	99,2	4,9	53,8	0,48	0,49
17	34	100,0	109,9	109,3	0,99	=	0,97	0,97	0,99	35	103,3	4,9	41,2	0,36	0,37
18	36	103,9	112,9	112,2	0,99	=	1,00	0,99	1,02	37	106,2	4,9	33,9	0,30	0,31
19	38	106,7	112,9	112,3	0,99	=	1,00	0,99	1,02	39	107,5	4,9	32,5	0,29	0,30
20	40	107,9	112,9	112,3	0,99	=	1,00	0,99	1,02	41	108,8	4,9	31,6	0,28	0,29
21	42	109,4	112,9	112,4	0,99	=	1,00	0,99	1,02	43	110,9	4,9	30,4	0,27	0,28
22	44	111,4	112,9	112,3	0,99	=	1,00	0,99	1,02	45	112,0	4,9	30,0	0,27	0,27
23	46	112,5	112,9	112,4	1,00	=	1,00	0,99	1,02	47	113,4	4,9	29,5	0,26	0,27
24	48	114,0	112,9	112,4	0,99	=	1,00	0,99	1,02	49	115,6	4,9	29,0	0,26	0,26


**M16 × 90 – 70 – Shr061 – H10 – TS-A11 – Shr.fix – 9 – Z28**

Shr.HV | Shb.HB | DTI.H10 | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.30.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z28 (mit DTI)

**Figure C.30.** Test results: component tensile test No. Z28 (including DTI)

**Tabelle C.49.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z28 (mit DTI) – Anziehen**Table C.49.** Test results: component tensile test No. Z28 (including DTI) – tightening

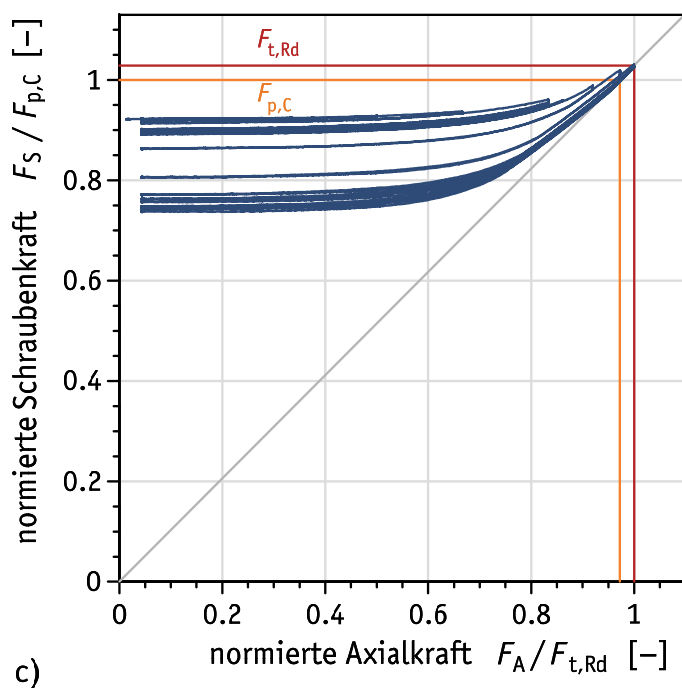
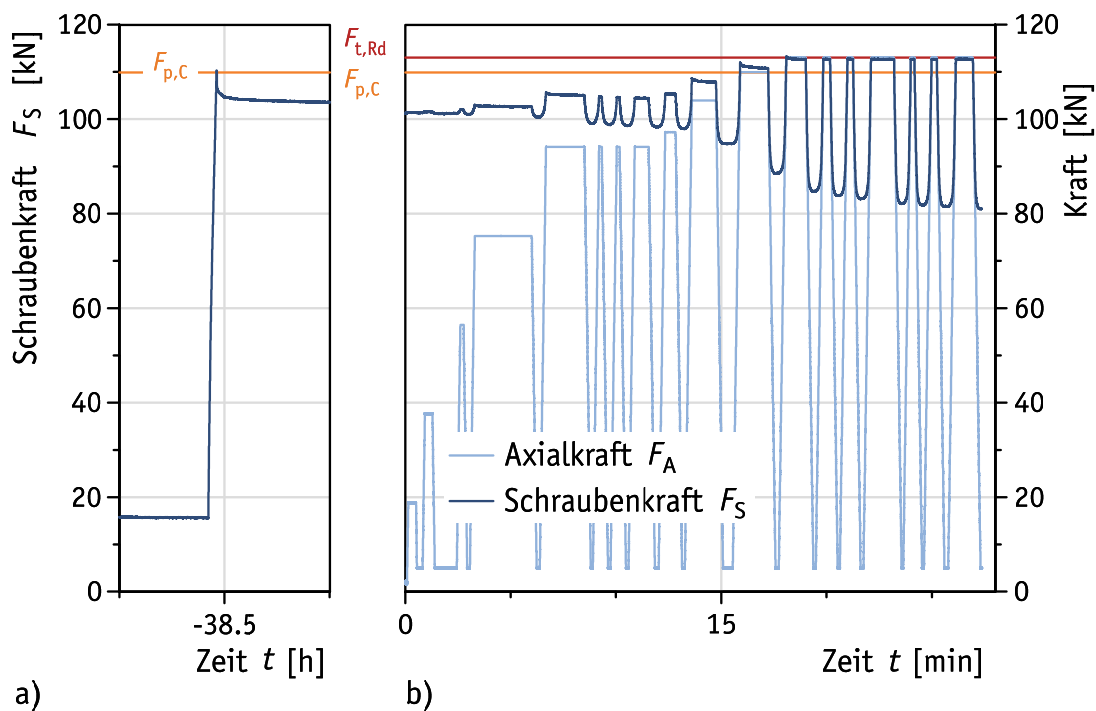
M16 – H10 – TS-A11 – Shr.fix – 9 – Z28			
$F_S$	[kN]		110
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,7
$F_S / F_{p,C}$	[-]		1,0
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0
		2	0,18
		3	0,25
		4	0,03
Fühllehre	[mm]	0,40	
$n_{refusal}$	[-]		4
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,13
$R/2$	[mm]		±0,14

**Tabelle C.50.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z28 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.50.** Test results: component tensile test No. Z28 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 90 – 70 – Shr061 – H10 – TS-A11 – Shr.fix – 9 – Z28															
M	M			110,3			0,00	0,98	1,00	M			110,3	0,98	1,00
0	0		0,0	101,0			0,00	0,89	0,92	1	-0,3	0,0	101,0	0,89	0,92
1	2	0,2	18,7	101,2	5,42		0,17	0,89	0,92	3	1,9	4,9	100,9	0,89	0,92
2	4	2,2	37,8	101,2	2,68		0,33	0,90	0,92	5	3,0	4,9	100,8	0,89	0,92
3	6	3,3	56,5	101,5	1,80		0,50	0,90	0,92	7	3,9	4,9	100,7	0,89	0,92
4	8	4,2	75,3	102,1	1,36		0,67	0,90	0,93	9	71,4	4,9	99,7	0,88	0,91
5	10	71,8	94,2	102,9	1,09		0,83	0,91	0,94	11	73,3	4,9	97,3	0,86	0,89
6	12	73,6	94,2	101,7	1,08		0,83	0,90	0,93	13	74,4	4,9	96,7	0,86	0,88
7	14	74,8	94,2	101,3	1,08		0,83	0,90	0,92	15	75,3	4,9	96,5	0,85	0,88
8	16	75,7	94,2	101,2	1,07		0,83	0,90	0,92	17	76,9	4,9	96,2	0,85	0,88
9	18	77,3	97,3	101,7	1,05		0,86	0,90	0,93	19	78,7	4,9	95,2	0,84	0,87
10	20	79,1	104,0	104,5	1,00		0,92	0,92	0,95	21	80,2	4,9	92,0	0,81	0,84
11	22	80,7	110,0	109,1	0,99	=	0,97	0,97	0,99	23	82,7	4,9	83,3	0,74	0,76
12	24	83,2	113,0	112,4	1,00	=	1,00	0,99	1,02	25	85,1	4,9	74,9	0,66	0,68
13	26	85,7	113,0	112,6	1,00	=	1,00	1,00	1,02	27	86,2	4,9	74,1	0,66	0,67
14	28	86,6	113,0	112,6	1,00	=	1,00	1,00	1,02	29	87,2	4,9	73,3	0,65	0,67
15	30	87,7	113,0	112,7	1,00	=	1,00	1,00	1,03	31	88,9	4,9	71,8	0,64	0,65
16	32	89,4	113,0	112,7	1,00	=	1,00	1,00	1,03	33	90,6	4,9	70,9	0,63	0,65
17	34	91,2	113,0	112,6	1,00	=	1,00	1,00	1,02	35	91,8	4,9	70,5	0,62	0,64
18	36	92,3	113,0	112,7	1,00	=	1,00	1,00	1,03	37	93,5	4,9	69,8	0,62	0,64

**M16 × 90 – 70 – Shr062 – H10 – TS-A11 – Shr.fix – 10 – Z29**


Shr.HV | Shb.HB | DTI.H10 | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.31.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z29 (mit DTI)

**Figure C.31.** Test results: component tensile test No. Z29 (including DTI)



**Tabelle C.51.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z29 (mit DTI) – Anziehen**Table C.51.** Test results: component tensile test No. Z29 (including DTI) – tightening

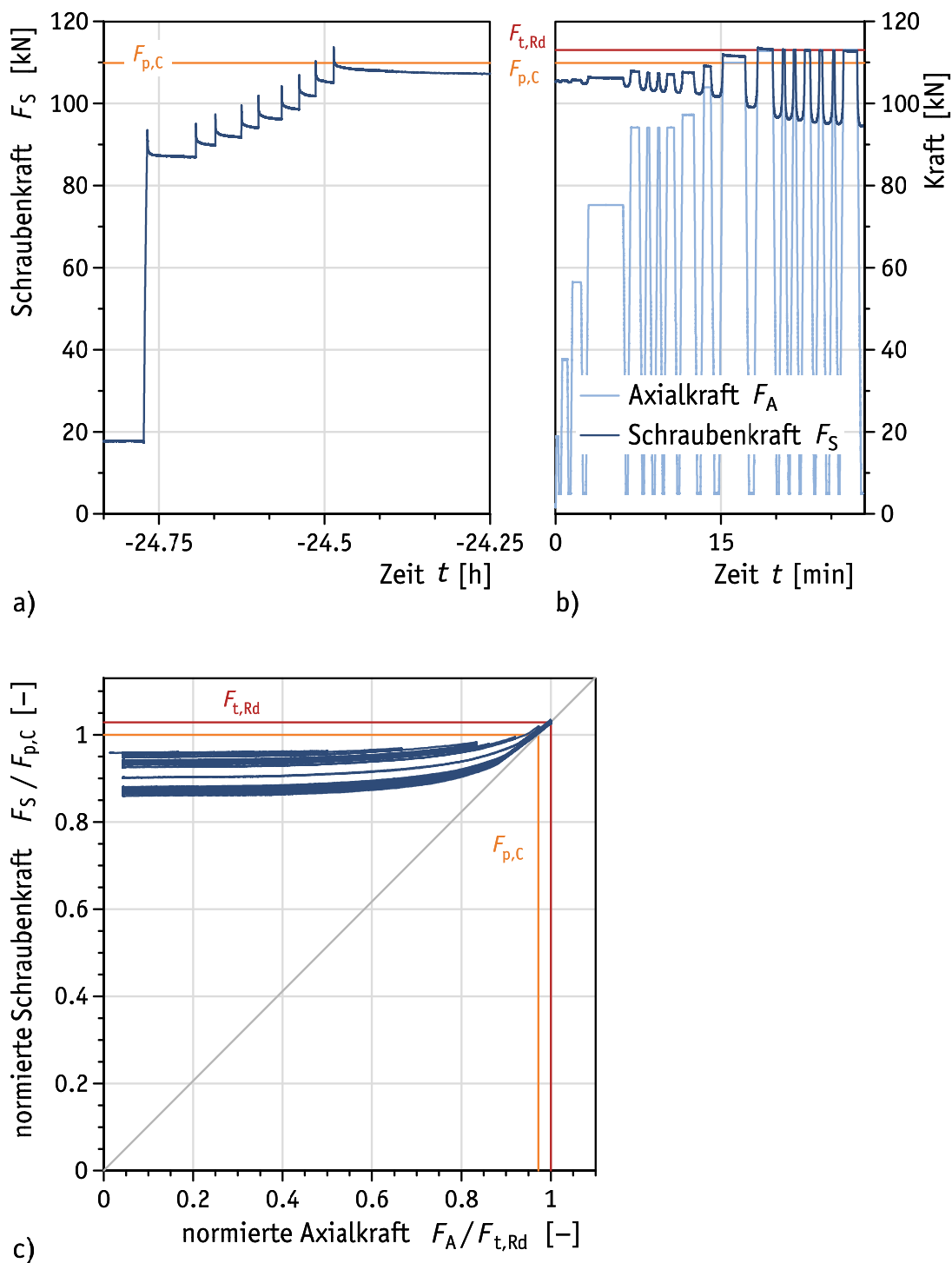
M16 – H10 – TS-A11 – Shr.fix – 10 – Z29			
$F_S$	[kN]		110
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,7
$F_S / F_{p,C}$	[-]		1,0
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,125
		2	0,2
		3	0,04
		4	0
Fühllehre	[mm]	0,40	
$n_{refusal}$	[-]		4
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,1
$R/2$	[mm]		±0,11

**Tabelle C.52.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z29 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.52.** Test results: component tensile test No. Z29 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 90 – 70 – Shr062 – H10 – TS-A11 – Shr.fix – 10 – Z29															
M	M			110,3			0,00	0,98	1,00	M			110,3	0,98	1,00
0	0		0,0	101,3			0,00	0,90	0,92	1	-0,3	0,0	101,3	0,90	0,92
1	2	0,1	18,8	101,5	5,40		0,17	0,90	0,92	3	0,7	4,9	101,4	0,90	0,92
2	4	0,9	37,6	101,6	2,70		0,33	0,90	0,92	5	1,9	4,9	101,2	0,90	0,92
3	6	2,6	56,5	102,0	1,81		0,50	0,90	0,93	7	3,0	4,9	101,0	0,89	0,92
4	8	3,3	75,3	103,0	1,37		0,67	0,91	0,94	9	6,3	4,9	100,4	0,89	0,91
5	10	6,7	94,2	105,6	1,12		0,83	0,93	0,96	11	8,9	4,9	99,1	0,88	0,90
6	12	9,2	94,2	104,7	1,11		0,83	0,93	0,95	13	9,7	4,9	98,8	0,87	0,90
7	14	10,0	94,2	104,6	1,11		0,83	0,93	0,95	15	10,5	4,9	98,6	0,87	0,90
8	16	10,9	94,2	104,4	1,11		0,83	0,92	0,95	17	11,9	4,9	98,4	0,87	0,90
9	18	12,3	97,3	105,4	1,08		0,86	0,93	0,96	19	13,2	4,9	98,0	0,87	0,89
10	20	13,6	104,0	108,7	1,05		0,92	0,96	0,99	21	15,3	4,9	94,8	0,84	0,86
11	22	15,9	110,0	112,0	1,02		0,97	0,99	1,02	23	17,6	4,9	88,6	0,78	0,81
12	24	18,1	113,0	113,2	1,00	=	1,00	1,00	1,03	25	19,4	4,9	84,7	0,75	0,77
13	26	19,9	113,0	112,7	1,00	=	1,00	1,00	1,03	27	20,6	4,9	83,8	0,74	0,76
14	28	21,0	113,0	112,7	1,00	=	1,00	1,00	1,03	29	21,7	4,9	83,2	0,74	0,76
15	30	22,1	113,0	112,7	1,00	=	1,00	1,00	1,03	31	23,6	4,9	82,2	0,73	0,75
16	32	24,0	113,0	112,7	1,00	=	1,00	1,00	1,03	33	24,6	4,9	81,8	0,72	0,74
17	34	25,0	113,0	112,7	1,00	=	1,00	1,00	1,03	35	25,7	4,9	81,6	0,72	0,74
18	36	26,1	113,0	112,7	1,00	=	1,00	1,00	1,03	37	27,4	4,9	81,1	0,72	0,74











**M16 × 90 – 70 – Shr061 – H10 – TS-A11 – Mu.rot – 11 – Z30**

Shr.HV | Shb.H | 59.5 | DTI.H10 | Shb.HN | Mu.HV.rot


**Bild C.32.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z30 (mit DTI)

**Figure C.32.** Test results: component tensile test No. Z30 (including DTI)

**Tabelle C.53.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z30 (mit DTI) – Anziehen**Table C.53.** Test results: component tensile test No. Z30 (including DTI) – tightening

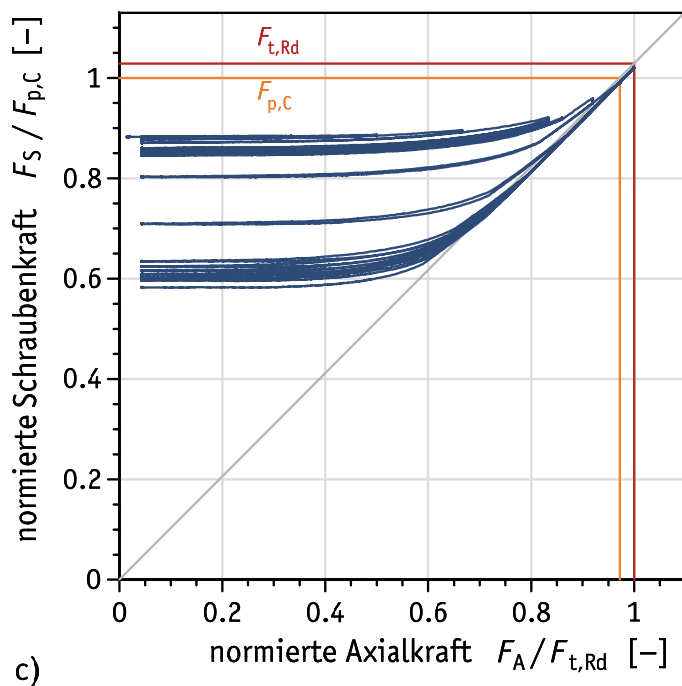
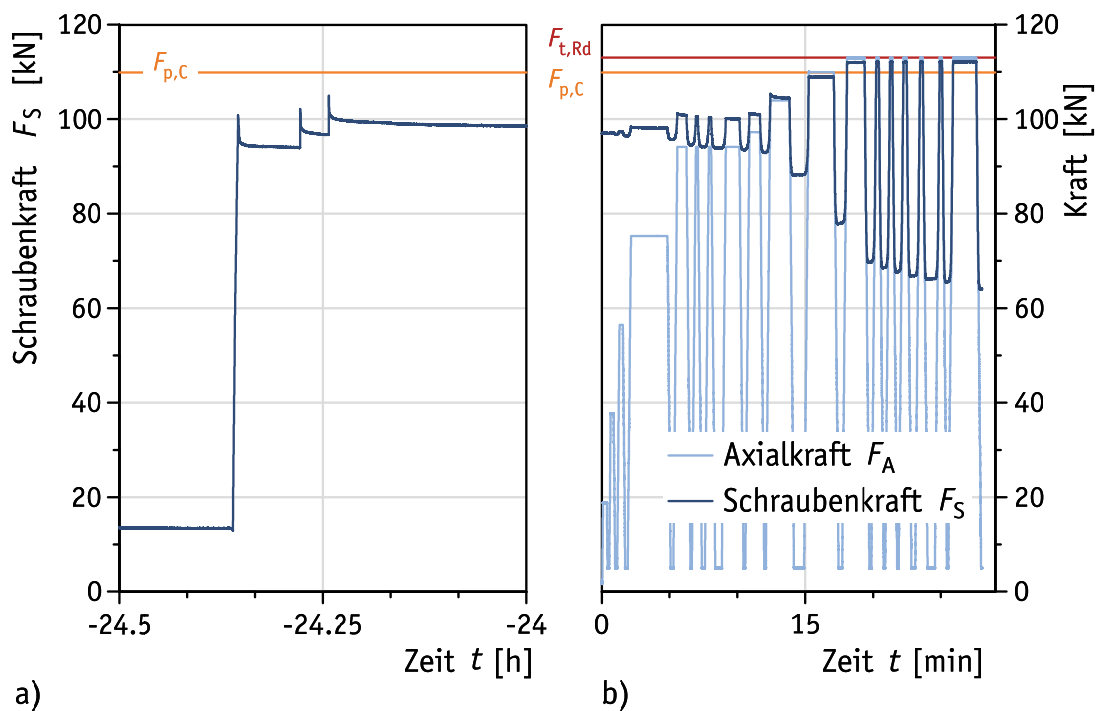
M16 – H10 – TS-A11 – Mu.rot – 11 – Z30											
$F_S$	[kN]		94	95	97	100	102	104	107	110	114
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,6	0,61	0,62	0,63	0,65	0,66	0,68	0,7	0,72
$F_S / F_{p,C}$	[-]		0,85	0,87	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97	1,0	1,03
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,22	0,2	0,15	0,1	0,05	0	0	0	0
		2	0,35	0,32	0,25	0,22	0,15	0,125	0,08	0,05	0
		3	0,6	0,6	0,55	0,5	0,5	0,45	0,4	0,35	0,32
		4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,35	0,32	0,28	0,25	0,22
Fühllehre	[mm]	0,25									
$n_{refusal}$	[-]		1	1	1	2	2	2	2	2	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,44	0,42	0,36	0,32	0,28	0,24	0,2	0,17	0,15
$R / 2$	[mm]		±0,22	±0,23	±0,23	±0,23	±0,25	±0,25	±0,23	±0,2	±0,18

**Tabelle C.54.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z30 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.54.** Test results: component tensile test No. Z30 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]	=	[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 90 – 70 – Shr061 – H10 – TS-A11 – Mu.rot – 11 – Z30															
M	M			113,7			0,00	1,01	1,03	M			113,7	1,01	1,03
0	0		0,0	105,4			0,00	0,93	0,96	1	-0,2	0,0	105,4	0,93	0,96
1	2	0,1	18,9	105,5	5,59		0,17	0,93	0,96	3	0,4	4,9	105,3	0,93	0,96
2	4	0,6	37,7	105,6	2,80		0,33	0,93	0,96	5	1,3	4,9	105,2	0,93	0,96
3	6	1,5	56,5	105,8	1,87		0,50	0,94	0,96	7	2,6	4,9	104,8	0,93	0,95
4	8	3,0	75,3	106,5	1,41		0,67	0,94	0,97	9	6,5	4,9	104,2	0,92	0,95
5	10	6,9	94,2	108,0	1,15		0,83	0,96	0,98	11	7,9	4,9	103,4	0,91	0,94
6	12	8,3	94,2	107,4	1,14		0,83	0,95	0,98	13	8,9	4,9	103,1	0,91	0,94
7	14	9,3	94,2	107,3	1,14		0,83	0,95	0,98	15	9,8	4,9	102,9	0,91	0,94
8	16	10,1	94,2	107,2	1,14		0,83	0,95	0,98	17	11,1	4,9	102,7	0,91	0,93
9	18	11,5	97,3	107,6	1,11		0,86	0,95	0,98	19	13,0	4,9	102,4	0,91	0,93
10	20	13,5	104,0	109,3	1,05		0,92	0,97	0,99	21	14,6	4,9	101,7	0,90	0,93
11	22	15,2	110,0	112,1	1,02		0,97	0,99	1,02	23	17,8	4,9	99,1	0,88	0,90
12	24	18,3	113,0	113,6	1,01	=	1,00	1,00	1,03	25	20,1	4,9	96,7	0,86	0,88
13	26	20,6	113,0	113,1	1,00	=	1,00	1,00	1,03	27	21,2	4,9	96,2	0,85	0,88
14	28	21,6	113,0	113,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	29	22,2	4,9	96,0	0,85	0,87
15	30	22,6	113,0	112,9	1,00	=	1,00	1,00	1,03	31	23,5	4,9	95,4	0,84	0,87
16	32	23,9	113,0	112,9	1,00	=	1,00	1,00	1,03	33	24,7	4,9	95,2	0,84	0,87
17	34	25,2	113,0	112,8	1,00	=	1,00	1,00	1,03	35	25,7	4,9	95,1	0,84	0,86
18	36	26,1	113,0	112,8	1,00	=	1,00	1,00	1,03	37	27,8	4,9	94,5	0,84	0,86






**M16 × 90 – 70 – Shr062 – H10 – TS-A11 – Mu.rot – 12 – Z31**

Shr.HV | Shb.H | 59.5 | DTI.H10 | Shb.HN | Mu.HV.rot


**Bild C.33.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z31 (mit DTI)

**Figure C.33.** Test results: component tensile test No. Z31 (including DTI)

**Tabelle C.55.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z31 (mit DTI) – Anziehen**Table C.55.** Test results: component tensile test No. Z31 (including DTI) – tightening

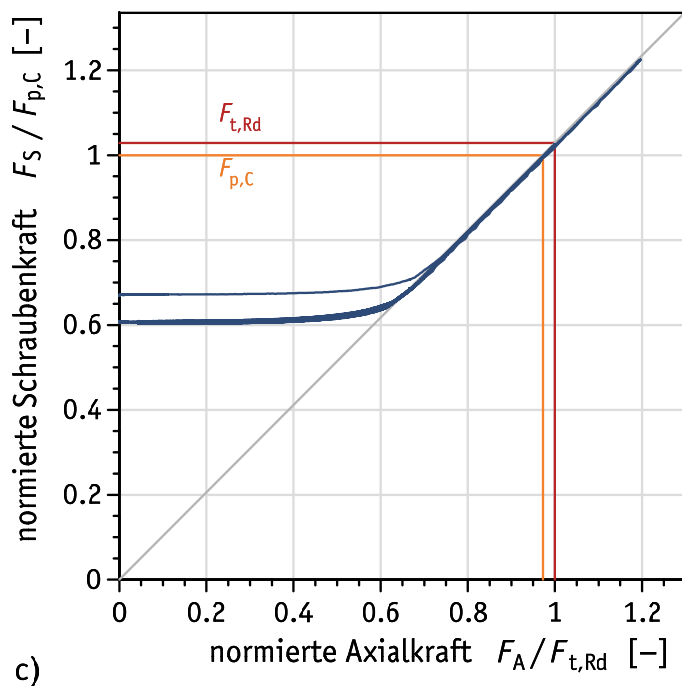
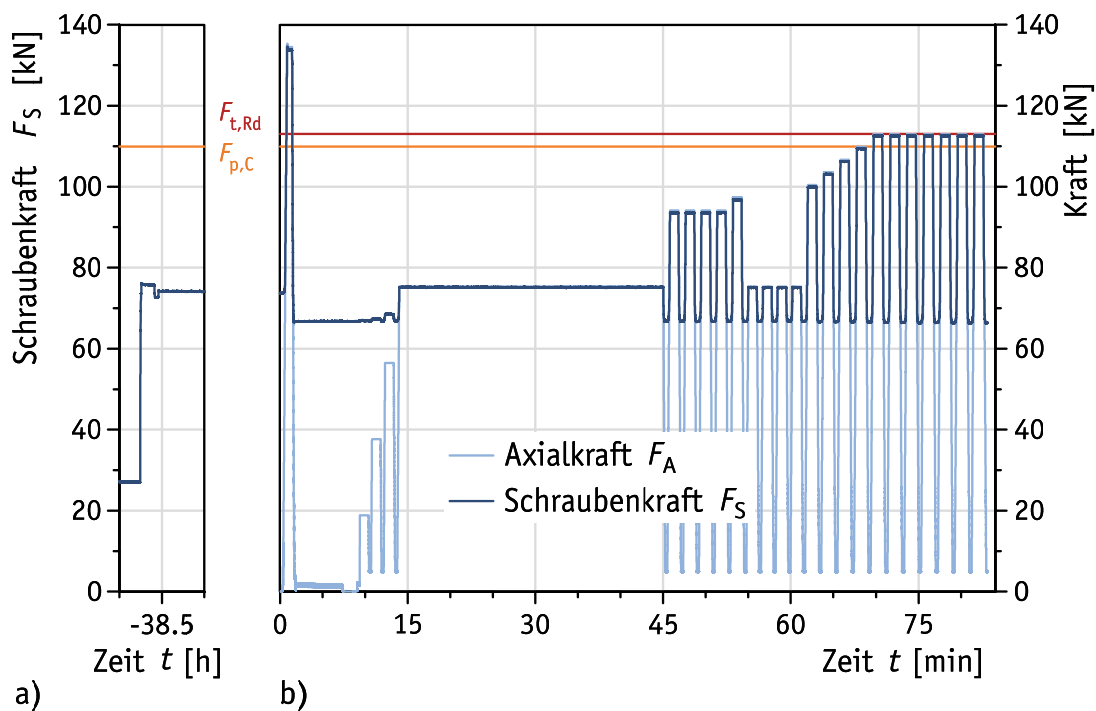
M16 – H10 – TS-A11 – Mu.rot – 12 – Z31					
$F_S$	[kN]		101	102	105
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,64	0,65	0,67
$F_S / F_{p,C}$	[-]		0,92	0,93	0,96
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,2	0,15	0,1
		2	0,05	0	0
		3	0,25	0,25	0,22
		4	0,4	0,4	0,35
Fühllehre	[mm]	0,25			
$n_{refusal}$	[-]		2	2	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,24	0,22	0,18
$R / 2$	[mm]		±0,2	±0,23	±0,2

**Tabelle C.56.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z31 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.56.** Test results: component tensile test No. Z31 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M16 × 90 – 70 – Shr062 – H10 – TS-A11 – Mu.rot – 12 – Z31															
M	M			105,0			0,00	0,93	0,96	M			105,0	0,93	0,96
0	0		0,1	97,0			0,00	0,86	0,88	1	-0,1	0,1	97,0	0,86	0,88
1	2	0,1	18,8	97,1	5,15		0,17	0,86	0,88	3	0,5	4,9	96,9	0,86	0,88
2	4	0,7	37,6	97,2	2,58		0,33	0,86	0,88	5	1,1	4,9	96,8	0,86	0,88
3	6	1,3	56,5	97,4	1,73		0,50	0,86	0,89	7	1,8	4,9	96,4	0,85	0,88
4	8	2,2	75,3	98,5	1,31		0,67	0,87	0,90	9	5,2	4,9	95,7	0,85	0,87
5	10	5,6	94,2	101,2	1,07		0,83	0,90	0,92	11	6,6	4,9	94,5	0,84	0,86
6	12	6,9	94,2	100,6	1,07		0,83	0,89	0,92	13	7,5	4,9	94,2	0,83	0,86
7	14	7,9	94,2	100,3	1,07		0,83	0,89	0,91	15	8,6	4,9	93,9	0,83	0,85
8	16	9,2	94,2	100,2	1,06		0,83	0,89	0,91	17	10,5	4,9	93,5	0,83	0,85
9	18	10,9	97,3	101,2	1,04		0,86	0,90	0,92	19	12,0	4,9	93,0	0,82	0,85
10	20	12,4	104,0	105,4	1,01		0,92	0,93	0,96	21	14,6	4,9	88,2	0,78	0,80
11	22	15,3	110,0	108,9	0,99	=	0,97	0,96	0,99	23	17,6	4,9	78,0	0,69	0,71
12	24	18,1	113,0	112,0	0,99	=	1,00	0,99	1,02	25	19,8	4,9	69,7	0,62	0,63
13	26	20,2	113,0	112,0	0,99	=	1,00	0,99	1,02	27	20,8	4,9	68,6	0,61	0,62
14	28	21,3	113,0	112,1	0,99	=	1,00	0,99	1,02	29	21,8	4,9	67,7	0,60	0,62
15	30	22,3	113,0	112,0	0,99	=	1,00	0,99	1,02	31	22,9	4,9	66,9	0,59	0,61
16	32	23,5	113,0	112,1	0,99	=	1,00	0,99	1,02	33	24,3	4,9	66,2	0,59	0,60
17	34	24,9	113,0	112,1	0,99	=	1,00	0,99	1,02	35	25,5	4,9	65,6	0,58	0,60
18	36	25,9	113,0	112,1	0,99	=	1,00	0,99	1,02	37	28,0	4,9	64,1	0,57	0,58

**M16 × 90 – 71 – Shr061 – H10 – Vgl – Z32**

Shr.HV | Shb.H | Shb.H | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot

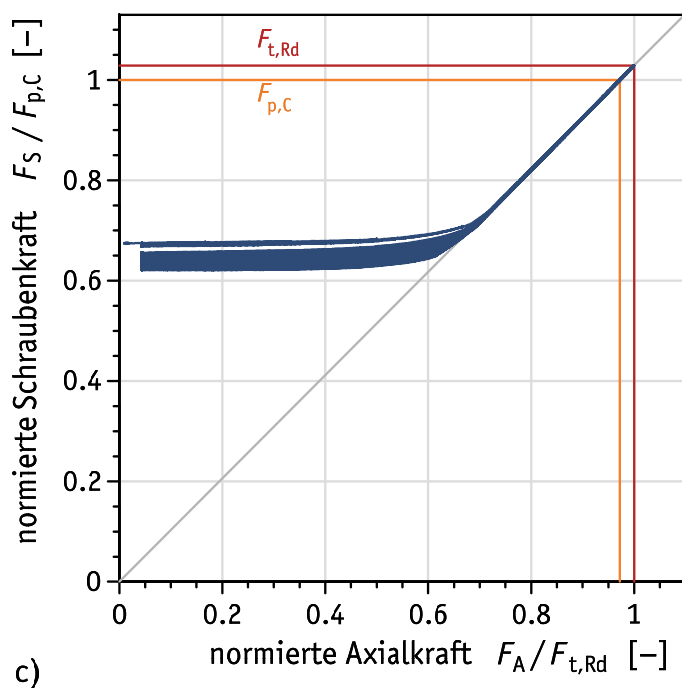
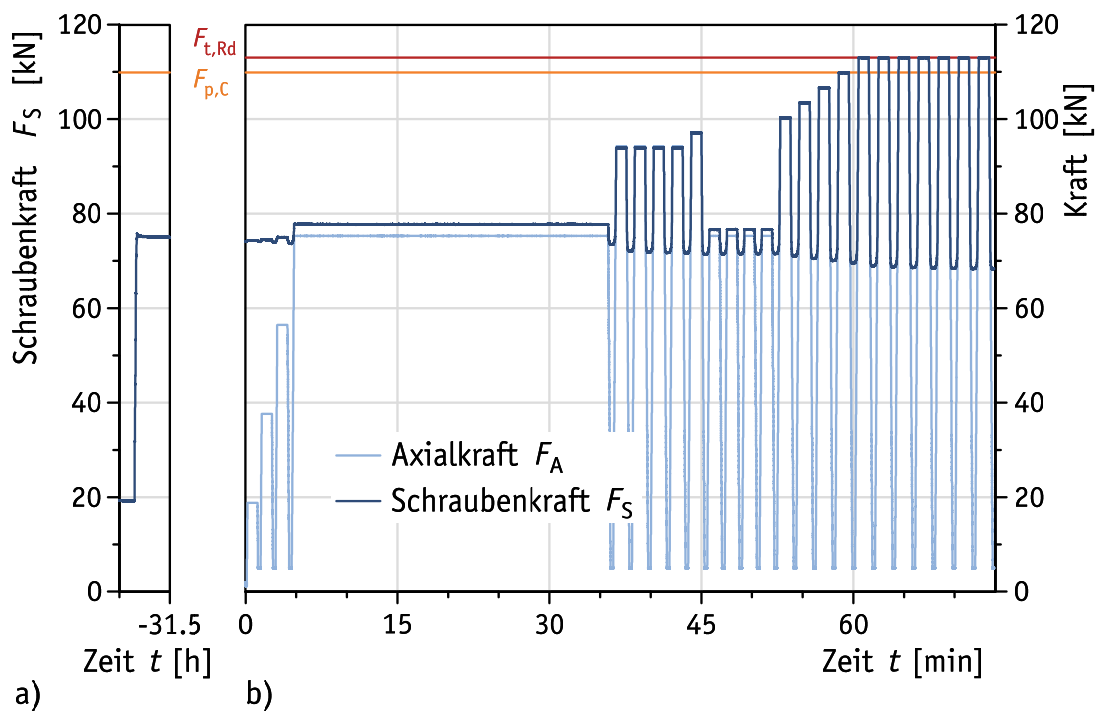
**Bild C.34.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z32 (ohne DTI)**Figure C.34.** Test results: component tensile test No. Z32 (without DTI)

**Tabelle C.57.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z32 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.57.** Test results: component tensile test No. Z32 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,c}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,c}$ [-]
<b>M16 × 90 – 71 – Shr061 – H10 – Vgl – Z32</b>															
M	M			74,3			0,00	0,66	0,68	M			74,3	0,66	0,68
0	0		0,0	73,6			0,00	0,65	0,67	1	0,1	0,0	73,6	0,65	0,67
1	2	0,9	135,2	134,6	1,00	=	1,20	1,19	1,22	3	8,8	0,0	66,7	0,59	0,61
2	4	9,4	18,8	66,9	3,55		0,17	0,59	0,61	5	10,6	4,9	66,8	0,59	0,61
3	6	10,8	37,6	67,3	1,79		0,33	0,60	0,61	7	12,0	4,9	66,8	0,59	0,61
4	8	12,4	56,5	68,6	1,21		0,50	0,61	0,62	9	13,7	4,9	66,8	0,59	0,61
5	10	14,0	75,3	75,1	1,00	=	0,67	0,66	0,68	11	45,4	4,9	66,7	0,59	0,61
6	12	45,8	94,1	93,5	0,99	=	0,83	0,83	0,85	13	47,2	4,9	66,7	0,59	0,61
7	14	47,7	94,1	93,5	0,99	=	0,83	0,83	0,85	15	49,0	4,9	66,7	0,59	0,61
8	16	49,5	94,1	93,6	0,99	=	0,83	0,83	0,85	17	50,9	4,9	66,7	0,59	0,61
9	18	51,4	94,1	93,5	0,99	=	0,83	0,83	0,85	19	52,7	4,9	66,8	0,59	0,61
10	20	53,2	97,3	96,8	0,99	=	0,86	0,86	0,88	21	54,6	4,9	66,7	0,59	0,61
11	22	55,0	75,3	75,1	1,00	=	0,67	0,66	0,68	23	56,3	4,9	66,8	0,59	0,61
12	24	56,7	75,3	75,1	1,00	=	0,67	0,66	0,68	25	58,0	4,9	66,8	0,59	0,61
13	26	58,5	75,3	75,0	1,00	=	0,67	0,66	0,68	27	59,8	4,9	66,8	0,59	0,61
14	28	60,2	75,3	75,1	1,00	=	0,67	0,66	0,68	29	61,6	4,9	66,7	0,59	0,61
15	30	62,0	100,4	99,8	0,99	=	0,89	0,88	0,91	31	63,4	4,9	66,6	0,59	0,61
16	32	63,9	103,6	103,0	0,99	=	0,92	0,91	0,94	33	65,3	4,9	66,6	0,59	0,61
17	34	65,8	106,7	106,2	1,00	=	0,94	0,94	0,97	35	67,2	4,9	66,6	0,59	0,61
18	36	67,8	109,8	109,4	1,00	=	0,97	0,97	1,00	37	69,2	4,9	66,5	0,59	0,61
19	38	69,7	113,0	112,5	1,00	=	1,00	1,00	1,02	39	71,2	4,9	66,5	0,59	0,61
20	40	71,7	113,0	112,5	1,00	=	1,00	1,00	1,02	41	73,2	4,9	66,5	0,59	0,60
21	42	73,7	113,0	112,6	1,00	=	1,00	1,00	1,02	43	75,1	4,9	66,4	0,59	0,60
22	44	75,7	113,0	112,5	1,00	=	1,00	1,00	1,02	45	77,1	4,9	66,5	0,59	0,60
23	46	77,6	113,0	112,6	1,00	=	1,00	1,00	1,02	47	79,1	4,9	66,4	0,59	0,60
24	48	79,6	113,0	112,4	1,00	=	1,00	0,99	1,02	49	81,1	4,9	66,3	0,59	0,60
25	50	81,6	113,0	112,6	1,00	=	1,00	1,00	1,02	51	83,1	5,0	66,4	0,59	0,60

**M16 × 100 – 81 – Shr018 – H10 – Vgl – Z33**

Shr.HV | Shb.H | Shb.H | 69 | Shb.H | Mu.HV.rot

**Bild C.35.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z33 (ohne DTI)**Figure C.35.** Test results: component tensile test No. Z33 (without DTI)

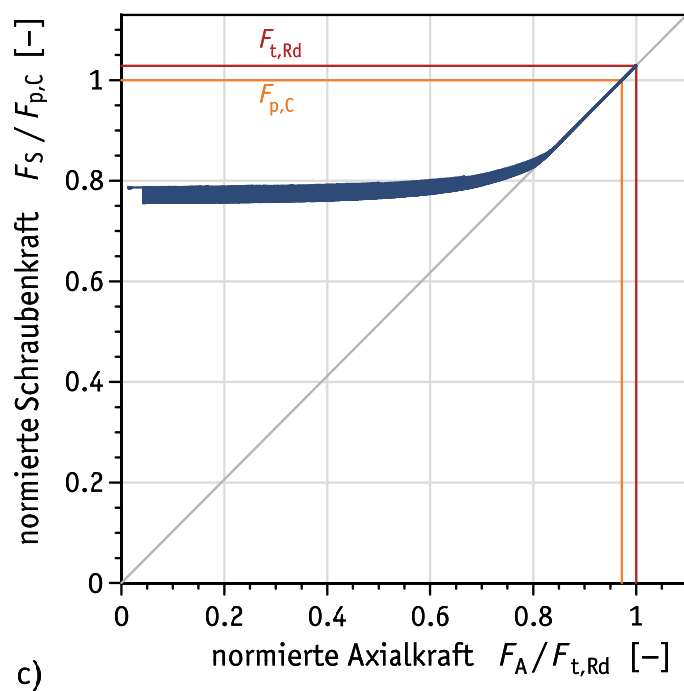
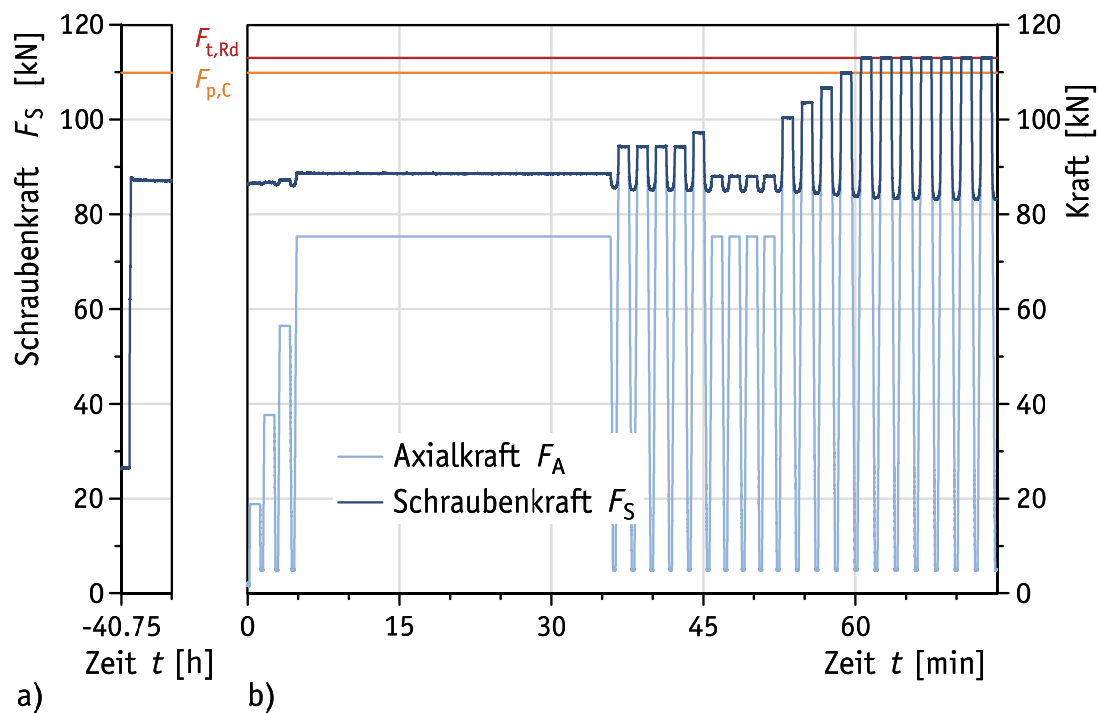


**Tabelle C.58.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z33 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.58.** Test results: component tensile test No. Z33 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M16 × 100 – 81 – Shr018 – H10 – Vgl – Z33</b>															
M	M			75,8			0,00	0,67	0,69	M			75,8	0,67	0,69
0	0		0,0	74,1			0,00	0,66	0,67	1	-0,5	0,0	74,1	0,66	0,67
1	2	0,2	18,8	74,3	3,95		0,17	0,66	0,68	3	1,4	4,9	74,1	0,66	0,67
2	4	1,6	37,6	74,5	1,98		0,33	0,66	0,68	5	2,8	4,9	73,9	0,65	0,67
3	6	3,1	56,5	75,0	1,33		0,50	0,66	0,68	7	4,4	4,9	73,7	0,65	0,67
4	8	4,8	75,3	77,8	1,03		0,67	0,69	0,71	9	36,2	4,9	73,4	0,65	0,67
5	10	36,6	94,1	93,8	1,00	=	0,83	0,83	0,85	11	38,0	4,9	72,1	0,64	0,66
6	12	38,4	94,1	93,9	1,00	=	0,83	0,83	0,85	13	39,9	4,9	71,9	0,64	0,65
7	14	40,3	94,1	93,9	1,00	=	0,83	0,83	0,85	15	41,7	4,9	71,8	0,63	0,65
8	16	42,2	94,1	93,9	1,00	=	0,83	0,83	0,85	17	43,6	4,9	71,7	0,63	0,65
9	18	44,0	97,3	97,1	1,00	=	0,86	0,86	0,88	19	45,4	4,9	71,4	0,63	0,65
10	20	45,8	75,3	76,6	1,02		0,67	0,68	0,70	21	47,2	4,9	71,5	0,63	0,65
11	22	47,5	75,3	76,7	1,02		0,67	0,68	0,70	23	48,9	4,9	71,5	0,63	0,65
12	24	49,3	75,3	76,7	1,02		0,67	0,68	0,70	25	50,6	4,9	71,6	0,63	0,65
13	26	51,0	75,3	76,6	1,02		0,67	0,68	0,70	27	52,4	4,9	71,6	0,63	0,65
14	28	52,8	100,4	100,3	1,00	=	0,89	0,89	0,91	29	54,3	4,9	71,0	0,63	0,65
15	30	54,7	103,5	103,5	1,00	=	0,92	0,92	0,94	31	56,1	4,9	70,5	0,62	0,64
16	32	56,6	106,7	106,6	1,00	=	0,94	0,94	0,97	33	58,1	4,9	70,1	0,62	0,64
17	34	58,6	109,8	109,8	1,00	=	0,97	0,97	1,00	35	60,1	4,9	69,6	0,62	0,63
18	36	60,5	112,9	113,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	37	62,1	4,9	69,0	0,61	0,63
19	38	62,5	113,0	113,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	39	64,0	4,9	68,8	0,61	0,63
20	40	64,5	112,9	113,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	41	66,0	4,9	68,6	0,61	0,62
21	42	66,5	112,9	113,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	43	68,0	4,9	68,5	0,61	0,62
22	44	68,4	112,9	113,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	45	69,9	4,9	68,4	0,61	0,62
23	46	70,4	112,9	113,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	47	71,9	4,9	68,3	0,60	0,62
24	48	72,4	112,9	112,9	1,00	=	1,00	1,00	1,03	49	73,9	4,9	68,3	0,60	0,62

**M16 × 90 – 71 – Shr062 – H10 – Vgl – Z34**

Shr.HV | Shb.H | Shb.H | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.36.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z34 (ohne DTI)

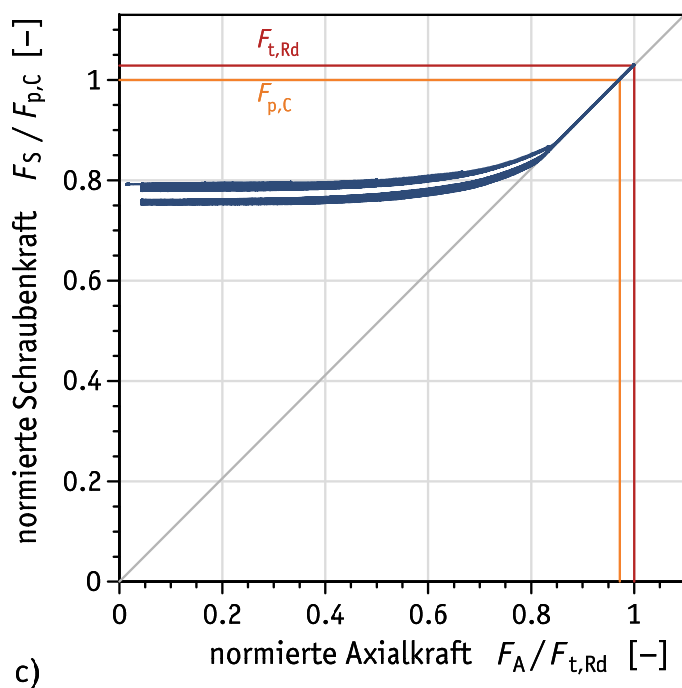
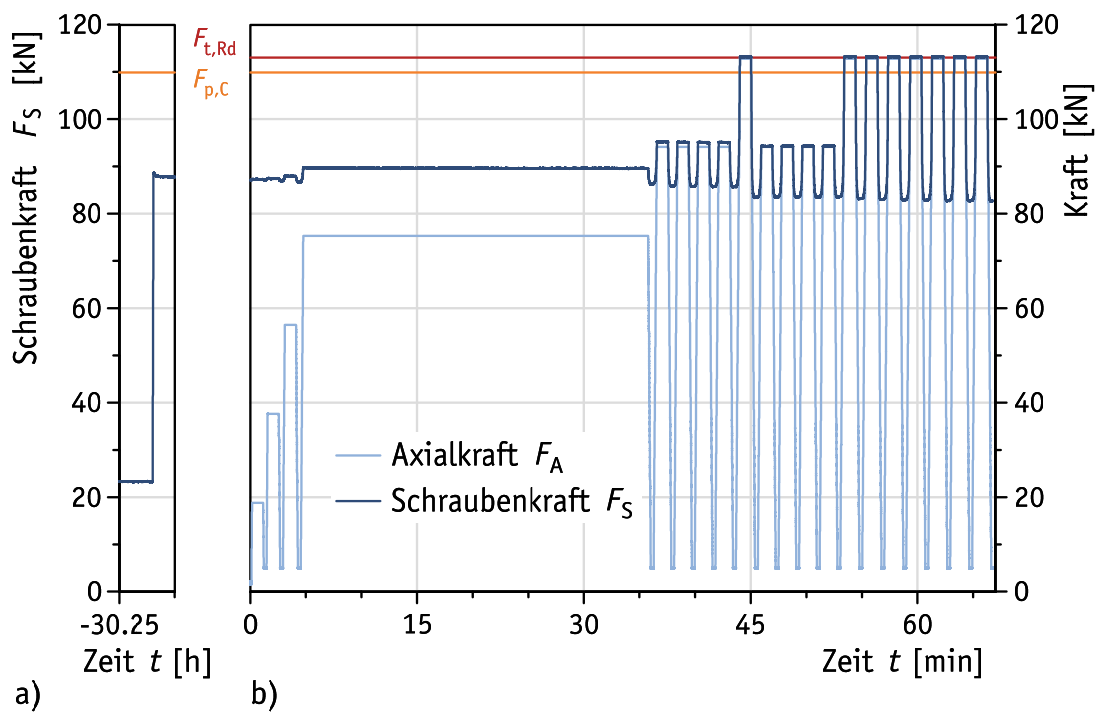
**Figure C.36.** Test results: component tensile test No. Z34 (without DTI)

**Tabelle C.59.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z34 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.59.** Test results: component tensile test No. Z34 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M16 × 90 – 71 – Shr062 – H10 – Vgl – Z34</b>															
M	M			87,8			0,00	0,78	0,80	M			87,8	0,78	0,80
0	0		0,0	86,4			0,00	0,76	0,79	1	-0,3	0,0	86,4	0,76	0,79
1	2	0,2	18,8	86,6	4,60		0,17	0,77	0,79	3	1,4	4,9	86,4	0,76	0,79
2	4	1,6	37,6	86,7	2,30		0,33	0,77	0,79	5	2,9	4,9	86,4	0,76	0,79
3	6	3,2	56,5	87,4	1,55		0,50	0,77	0,80	7	4,5	4,9	86,0	0,76	0,78
4	8	4,8	75,3	88,7	1,18		0,67	0,79	0,81	9	36,2	4,9	85,7	0,76	0,78
5	10	36,6	94,1	94,4	1,00	=	0,83	0,84	0,86	11	38,0	4,9	85,3	0,75	0,78
6	12	38,5	94,1	94,3	1,00	=	0,83	0,83	0,86	13	39,9	4,9	85,2	0,75	0,78
7	14	40,3	94,1	94,3	1,00	=	0,83	0,83	0,86	15	41,7	4,9	85,1	0,75	0,77
8	16	42,2	94,1	94,3	1,00	=	0,83	0,83	0,86	17	43,6	4,9	85,0	0,75	0,77
9	18	44,0	97,3	97,2	1,00	=	0,86	0,86	0,88	19	45,5	4,9	84,9	0,75	0,77
10	20	45,8	75,3	88,0	1,17		0,67	0,78	0,80	21	47,2	4,9	85,0	0,75	0,77
11	22	47,6	75,3	87,9	1,17		0,67	0,78	0,80	23	48,9	4,9	85,0	0,75	0,77
12	24	49,3	75,3	88,0	1,17		0,67	0,78	0,80	25	50,6	4,9	84,9	0,75	0,77
13	26	51,0	75,3	88,0	1,17		0,67	0,78	0,80	27	52,4	4,9	85,0	0,75	0,77
14	28	52,8	100,4	100,4	1,00	=	0,89	0,89	0,91	29	54,3	4,9	84,8	0,75	0,77
15	30	54,7	103,5	103,5	1,00	=	0,92	0,92	0,94	31	56,2	4,9	84,5	0,75	0,77
16	32	56,7	106,7	106,7	1,00	=	0,94	0,94	0,97	33	58,1	4,9	84,2	0,74	0,77
17	34	58,6	109,8	109,9	1,00	=	0,97	0,97	1,00	35	60,0	4,9	83,9	0,74	0,76
18	36	60,6	113,0	113,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	37	62,0	4,9	83,6	0,74	0,76
19	38	62,6	113,0	113,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	39	64,1	4,9	83,3	0,74	0,76
20	40	64,5	113,0	113,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	41	66,0	4,9	83,3	0,74	0,76
21	42	66,5	113,0	113,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	43	68,0	4,9	83,2	0,74	0,76
22	44	68,5	113,0	113,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	45	70,0	4,9	83,2	0,74	0,76
23	46	70,5	113,0	113,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	47	71,9	4,9	83,2	0,74	0,76
24	48	72,4	113,0	113,1	1,00	=	1,00	1,00	1,03	49	73,9	4,9	83,2	0,74	0,76

**M16 × 90 – 71 – Shr062 – H10 – Vgl – Z35**

Shr.HV | Shb.H | Shb.H | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.37.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z35 (ohne DTI)

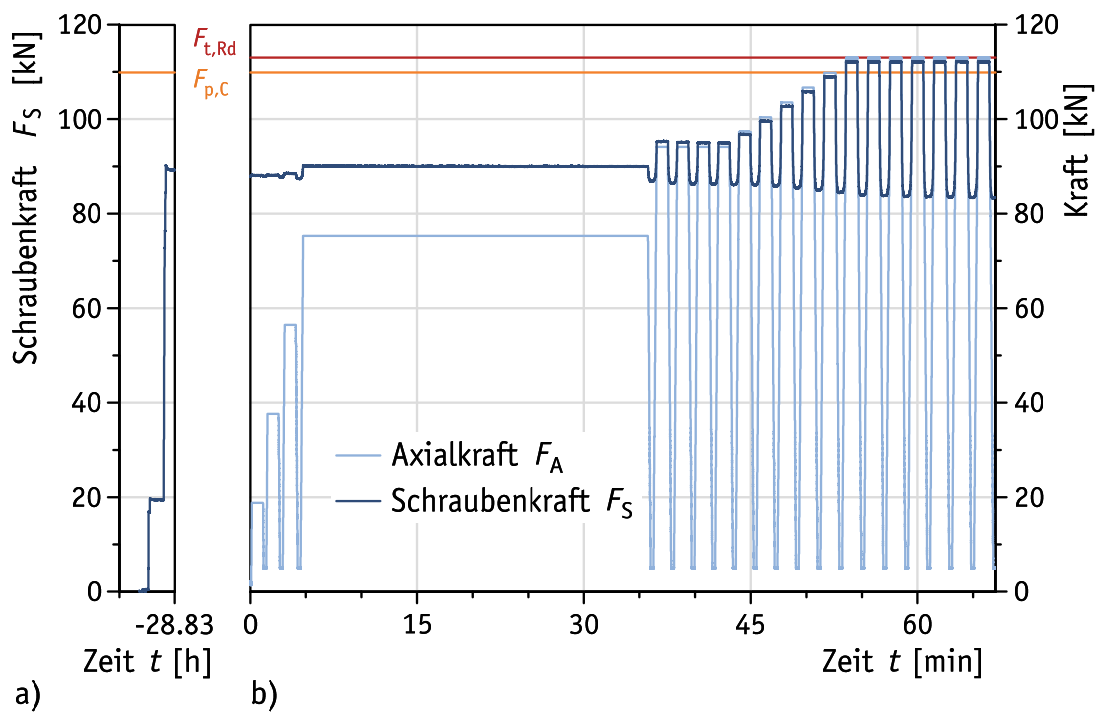
**Figure C.37.** Test results: component tensile test No. Z35 (without DTI)

**Tabelle C.60.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z35 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.60.** Test results: component tensile test No. Z35 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M16 × 90 – 71 – Shr062 – H10 – Vgl – Z35</b>															
M	M			88,6			0,00	0,78	0,81	M			88,6	0,78	0,81
0	0		0,0	87,1			0,00	0,77	0,79	1	-0,3	0,0	87,1	0,77	0,79
1	2	0,2	18,8	87,2	4,64		0,17	0,77	0,79	3	1,4	4,9	87,0	0,77	0,79
2	4	1,6	37,7	87,5	2,32		0,33	0,77	0,80	5	2,8	4,9	87,0	0,77	0,79
3	6	3,1	56,5	88,0	1,56		0,50	0,78	0,80	7	4,4	4,9	86,6	0,77	0,79
4	8	4,8	75,3	89,7	1,19		0,67	0,79	0,82	9	36,1	4,9	86,3	0,76	0,78
5	10	36,6	94,1	95,2	1,01	=	0,83	0,84	0,87	11	38,0	4,9	85,9	0,76	0,78
6	12	38,4	94,1	95,2	1,01	=	0,83	0,84	0,87	13	39,8	4,9	85,7	0,76	0,78
7	14	40,3	94,1	95,1	1,01	=	0,83	0,84	0,87	15	41,7	4,9	85,8	0,76	0,78
8	16	42,1	94,1	95,1	1,01	=	0,83	0,84	0,87	17	43,5	4,9	85,7	0,76	0,78
9	18	44,0	113,0	113,1	1,00	=	1,00	1,00	1,03	19	45,5	4,9	83,5	0,74	0,76
10	20	45,9	94,1	94,2	1,00	=	0,83	0,83	0,86	21	47,4	4,9	83,5	0,74	0,76
11	22	47,8	94,1	94,3	1,00	=	0,83	0,83	0,86	23	49,2	4,9	83,6	0,74	0,76
12	24	49,6	94,1	94,3	1,00	=	0,83	0,83	0,86	25	51,1	4,9	83,5	0,74	0,76
13	26	51,5	94,1	94,3	1,00	=	0,83	0,83	0,86	27	52,9	4,9	83,5	0,74	0,76
14	28	53,4	113,0	113,2	1,00	=	1,00	1,00	1,03	29	54,9	4,9	83,2	0,74	0,76
15	30	55,4	113,0	113,2	1,00	=	1,00	1,00	1,03	31	56,9	4,9	82,9	0,73	0,75
16	32	57,4	113,0	113,1	1,00	=	1,00	1,00	1,03	33	58,9	4,9	82,9	0,73	0,75
17	34	59,3	113,0	113,1	1,00	=	1,00	1,00	1,03	35	60,8	4,9	82,8	0,73	0,75
18	36	61,3	113,0	113,2	1,00	=	1,00	1,00	1,03	37	62,8	4,9	82,8	0,73	0,75
19	38	63,3	113,0	113,3	1,00	=	1,00	1,00	1,03	39	64,8	4,9	82,8	0,73	0,75
20	40	65,3	113,0	113,1	1,00	=	1,00	1,00	1,03	41	66,8	4,9	82,7	0,73	0,75

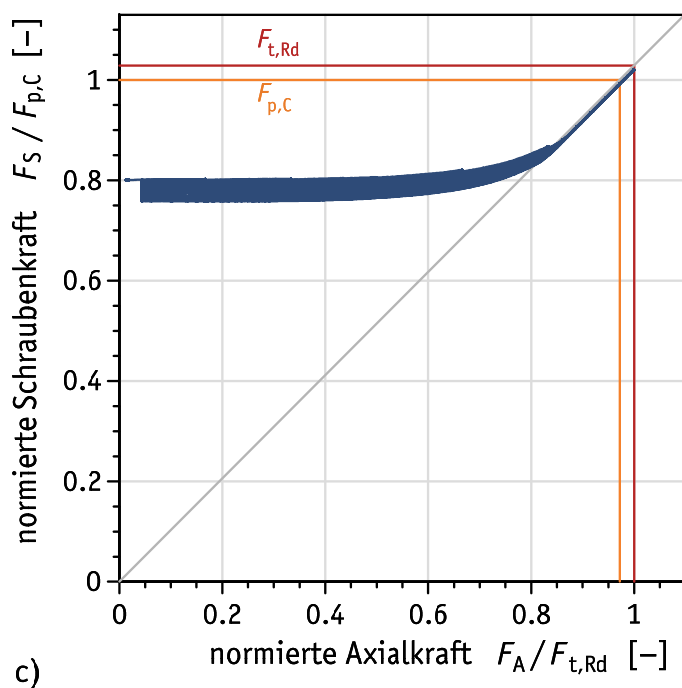
**M16 × 90 – 71 – Shr061 – H10 – Vgl – Z36**

Shr.HV | Shb.H | Shb.H | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot



a)

b)



c)

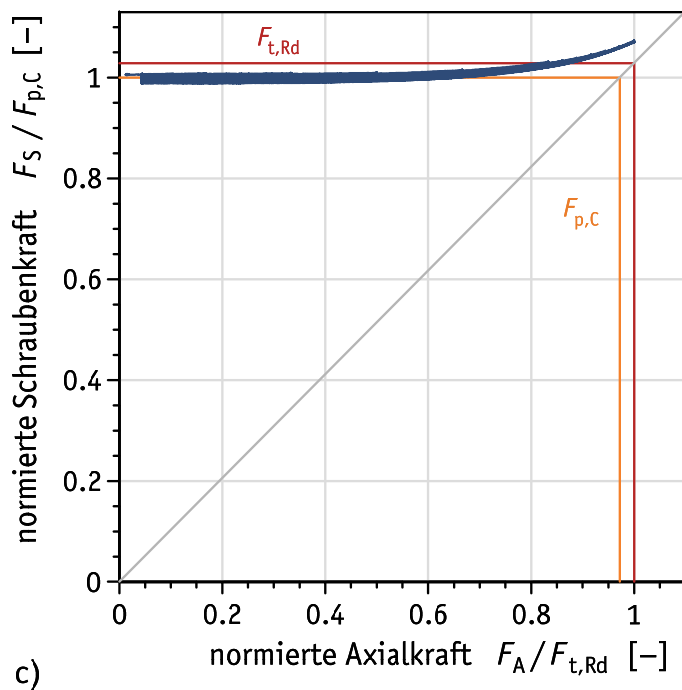
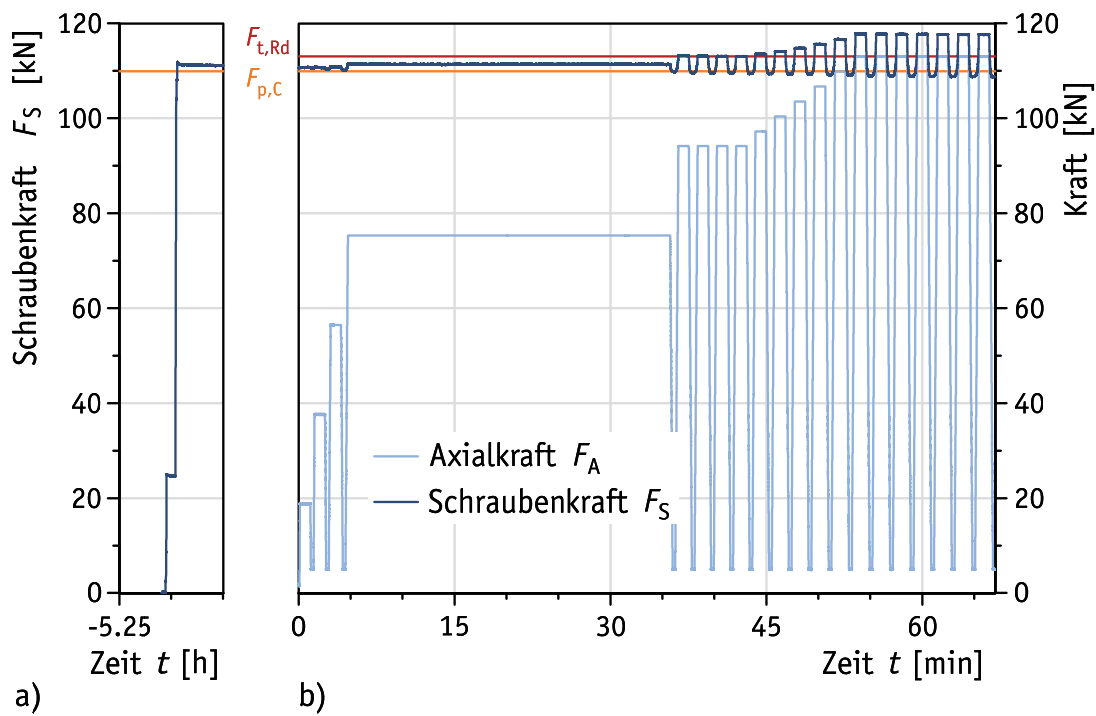
**Bild C.38.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z36 (ohne DTI)**Figure C.38.** Test results: component tensile test No. Z36 (without DTI)

**Tabelle C.61.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z36 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.61.** Test results: component tensile test No. Z36 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M16 × 90 – 71 – Shr061 – H10 – Vgl – Z36</b>															
M	M			90,3			0,00	0,80	0,82	M			90,3	0,80	0,82
0	0		0,0	88,0			0,00	0,78	0,80	1	-0,4	0,0	88,0	0,78	0,80
1	2	0,2	18,8	88,1	4,68		0,17	0,78	0,80	3	1,3	4,9	87,9	0,78	0,80
2	4	1,6	37,6	88,2	2,34		0,33	0,78	0,80	5	2,8	4,9	87,7	0,78	0,80
3	6	3,1	56,5	88,6	1,57		0,50	0,78	0,81	7	4,4	4,9	87,4	0,77	0,80
4	8	4,8	75,3	90,2	1,20		0,67	0,80	0,82	9	36,1	4,9	86,9	0,77	0,79
5	10	36,6	94,1	95,3	1,01		0,83	0,84	0,87	11	38,0	4,9	86,5	0,76	0,79
6	12	38,4	94,1	95,1	1,01		0,83	0,84	0,87	13	39,8	4,9	86,3	0,76	0,79
7	14	40,3	94,1	95,0	1,01		0,83	0,84	0,86	15	41,7	4,9	86,3	0,76	0,79
8	16	42,1	94,1	95,0	1,01		0,83	0,84	0,86	17	43,5	4,9	86,1	0,76	0,78
9	18	44,0	97,3	96,7	0,99	=	0,86	0,86	0,88	19	45,4	4,9	86,1	0,76	0,78
10	20	45,8	100,4	99,5	0,99	=	0,89	0,88	0,91	21	47,3	4,9	85,8	0,76	0,78
11	22	47,7	103,6	102,7	0,99	=	0,92	0,91	0,93	23	49,2	4,9	85,5	0,76	0,78
12	24	49,7	106,7	106,0	0,99	=	0,94	0,94	0,96	25	51,1	4,9	85,0	0,75	0,77
13	26	51,6	109,8	109,0	0,99	=	0,97	0,96	0,99	27	53,1	4,9	84,6	0,75	0,77
14	28	53,6	113,0	112,1	0,99	=	1,00	0,99	1,02	29	55,1	4,9	84,0	0,74	0,76
15	30	55,6	113,0	112,1	0,99	=	1,00	0,99	1,02	31	57,0	4,9	83,9	0,74	0,76
16	32	57,5	113,0	112,0	0,99	=	1,00	0,99	1,02	33	59,0	4,9	83,7	0,74	0,76
17	34	59,5	113,0	112,2	0,99	=	1,00	0,99	1,02	35	61,0	4,9	83,6	0,74	0,76
18	36	61,5	113,0	112,1	0,99	=	1,00	0,99	1,02	37	63,0	4,9	83,5	0,74	0,76
19	38	63,5	113,0	112,1	0,99	=	1,00	0,99	1,02	39	65,0	4,9	83,4	0,74	0,76
20	40	65,4	113,0	112,1	0,99	=	1,00	0,99	1,02	41	66,9	4,9	83,4	0,74	0,76

**M16 × 90 – 71 – Shr061 – H10 – Vgl – Z37**

Shr.HV | Shb.H | Shb.H | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.39.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z37 (ohne DTI)

**Figure C.39.** Test results: component tensile test No. Z37 (without DTI)

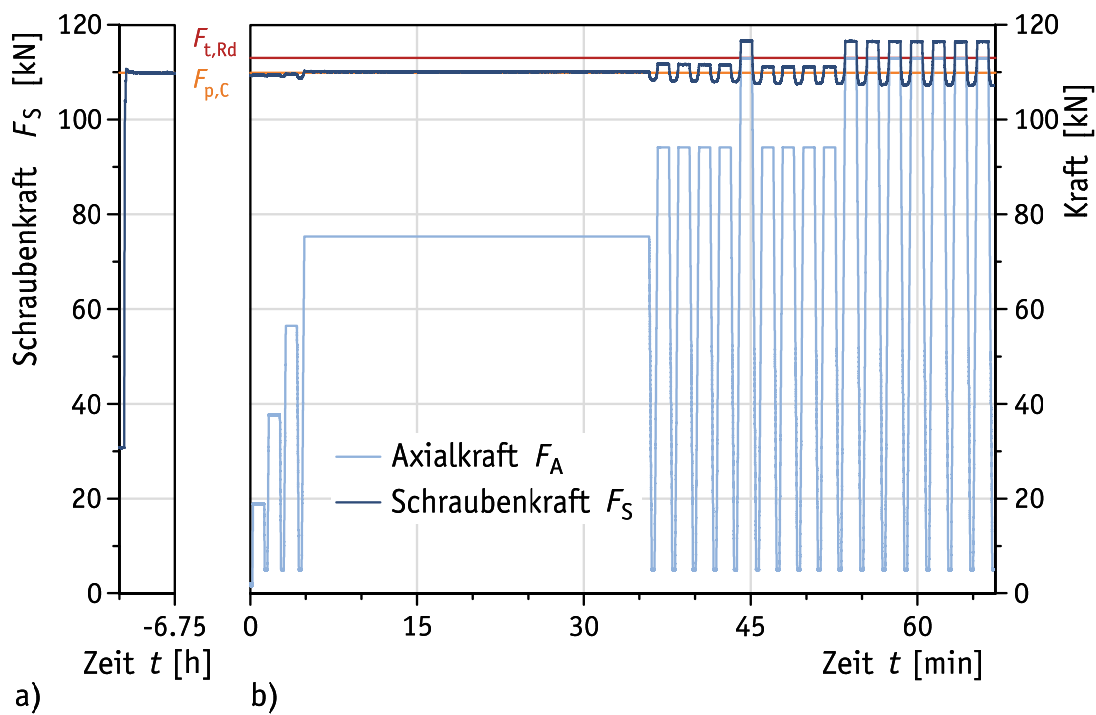


**Tabelle C.62.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z37 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.62.** Test results: component tensile test No. Z37 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	Klaffen =	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M16 × 90 – 71 – Shr061 – H10 – Vgl – Z37</b>															
M	M			111,9			0,00	0,99	1,02	M			111,9	0,99	1,02
0	0		0,0	110,6			0,00	0,98	1,01	1	-0,3	0,0	110,6	0,98	1,01
1	2	0,1	18,9	110,8	5,87		0,17	0,98	1,01	3	1,3	4,9	110,5	0,98	1,01
2	4	1,5	37,6	110,8	2,95		0,33	0,98	1,01	5	2,8	4,9	110,4	0,98	1,00
3	6	3,1	56,5	111,0	1,96		0,50	0,98	1,01	7	4,4	4,9	110,1	0,97	1,00
4	8	4,7	75,3	111,4	1,48		0,67	0,99	1,01	9	36,1	4,9	109,8	0,97	1,00
5	10	36,5	94,1	113,3	1,20		0,83	1,00	1,03	11	38,0	4,9	109,6	0,97	1,00
6	12	38,4	94,1	113,0	1,20		0,83	1,00	1,03	13	39,8	4,9	109,6	0,97	1,00
7	14	40,2	94,1	113,1	1,20		0,83	1,00	1,03	15	41,7	4,9	109,6	0,97	1,00
8	16	42,1	94,1	113,0	1,20		0,83	1,00	1,03	17	43,5	4,9	109,5	0,97	1,00
9	18	44,0	97,3	113,5	1,17		0,86	1,00	1,03	19	45,4	4,9	109,4	0,97	1,00
10	20	45,8	100,4	114,1	1,14		0,89	1,01	1,04	21	47,3	4,9	109,3	0,97	0,99
11	22	47,7	103,6	114,7	1,11		0,92	1,01	1,04	23	49,2	4,9	109,3	0,97	0,99
12	24	49,7	106,7	115,6	1,08		0,94	1,02	1,05	25	51,1	4,9	109,2	0,97	0,99
13	26	51,6	109,8	116,6	1,06		0,97	1,03	1,06	27	53,0	4,9	109,1	0,96	0,99
14	28	53,6	113,0	117,8	1,04		1,00	1,04	1,07	29	55,0	4,9	109,0	0,96	0,99
15	30	55,6	112,9	117,7	1,04		1,00	1,04	1,07	31	57,0	4,9	108,9	0,96	0,99
16	32	57,5	113,0	117,7	1,04		1,00	1,04	1,07	33	59,0	4,9	108,9	0,96	0,99
17	34	59,5	113,0	117,7	1,04		1,00	1,04	1,07	35	61,0	4,9	108,9	0,96	0,99
18	36	61,5	113,0	117,6	1,04		1,00	1,04	1,07	37	63,0	4,9	108,8	0,96	0,99
19	38	63,5	113,0	117,6	1,04		1,00	1,04	1,07	39	65,0	4,9	108,8	0,96	0,99
20	40	65,4	113,0	117,6	1,04		1,00	1,04	1,07	41	66,9	4,9	108,8	0,96	0,99

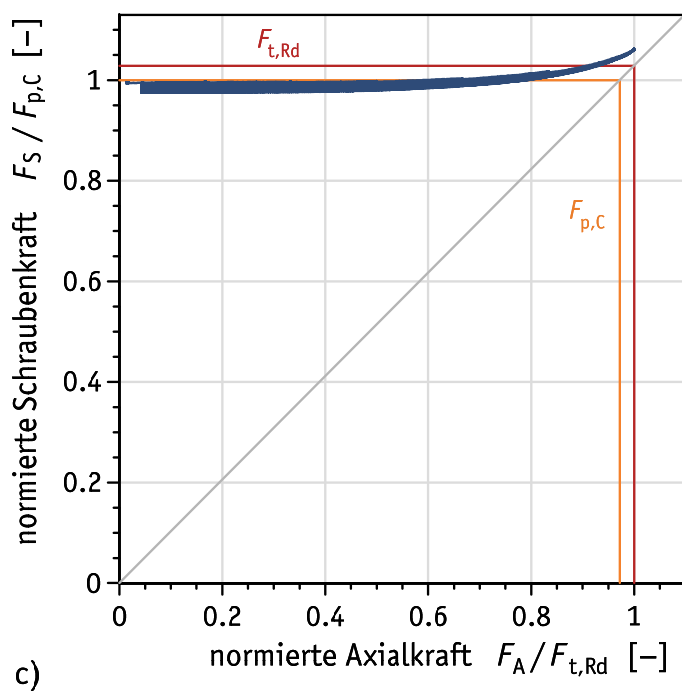
**M16 × 90 – 71 – Shr062 – H10 – Vgl – Z38**

Shr.HV | Shb.H | Shb.H | 59.5 | Shb.H | Mu.HV.rot



a)

b)



c)

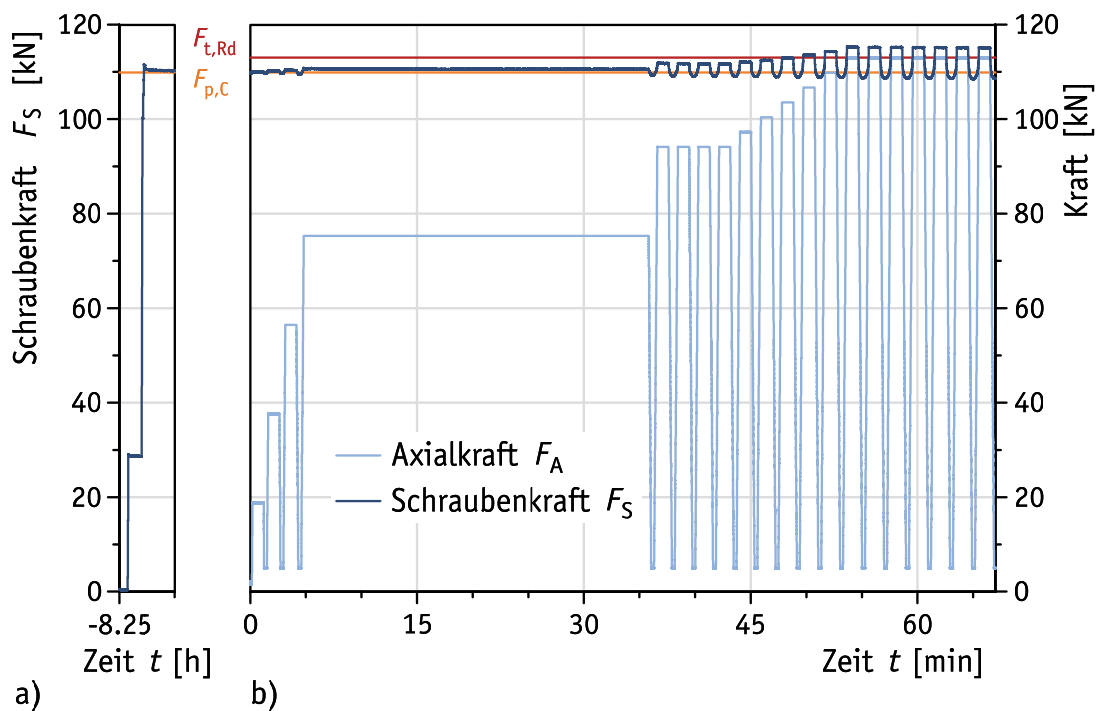
**Bild C.40.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z38 (ohne DTI)**Figure C.40.** Test results: component tensile test No. Z38 (without DTI)

**Tabelle C.63.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z38 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.63.** Test results: component tensile test No. Z38 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	Klaffen =	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M16 × 90 – 71 – Shr062 – H10 – Vgl – Z38</b>															
M	M			110,7			0,00	0,98	1,01	M			110,7	0,98	1,01
0	0		0,0	109,4			0,00	0,97	1,00	1	-0,3	0,0	109,4	0,97	1,00
1	2	0,3	18,9	109,5	5,80		0,17	0,97	1,00	3	1,4	4,9	109,3	0,97	0,99
2	4	1,7	37,7	109,5	2,90		0,33	0,97	1,00	5	2,9	4,9	109,2	0,97	0,99
3	6	3,2	56,5	109,6	1,94		0,50	0,97	1,00	7	4,5	4,9	108,7	0,96	0,99
4	8	4,9	75,3	110,3	1,46		0,67	0,98	1,00	9	36,2	4,9	108,4	0,96	0,99
5	10	36,7	94,2	111,8	1,19		0,83	0,99	1,02	11	38,1	4,9	108,1	0,96	0,98
6	12	38,5	94,1	111,7	1,19		0,83	0,99	1,02	13	39,9	4,9	108,1	0,96	0,98
7	14	40,4	94,1	111,7	1,19		0,83	0,99	1,02	15	41,8	4,9	108,1	0,96	0,98
8	16	42,2	94,1	111,5	1,18		0,83	0,99	1,01	17	43,6	4,9	108,0	0,96	0,98
9	18	44,1	113,0	116,6	1,03		1,00	1,03	1,06	19	45,6	4,9	107,6	0,95	0,98
10	20	46,0	94,1	111,1	1,18		0,83	0,98	1,01	21	47,5	4,9	107,7	0,95	0,98
11	22	47,9	94,1	111,1	1,18		0,83	0,98	1,01	23	49,3	4,9	107,6	0,95	0,98
12	24	49,8	94,1	111,1	1,18		0,83	0,98	1,01	25	51,2	4,9	107,6	0,95	0,98
13	26	51,6	94,1	111,1	1,18		0,83	0,98	1,01	27	53,0	4,9	107,6	0,95	0,98
14	28	53,5	113,0	116,6	1,03		1,00	1,03	1,06	29	55,0	4,9	107,5	0,95	0,98
15	30	55,5	113,0	116,5	1,03		1,00	1,03	1,06	31	57,0	4,9	107,5	0,95	0,98
16	32	57,5	113,0	116,4	1,03		1,00	1,03	1,06	33	58,9	4,9	107,4	0,95	0,98
17	34	59,4	113,0	116,5	1,03		1,00	1,03	1,06	35	60,9	4,9	107,3	0,95	0,98
18	36	61,4	113,0	116,5	1,03		1,00	1,03	1,06	37	62,9	4,9	107,2	0,95	0,98
19	38	63,4	113,0	116,5	1,03		1,00	1,03	1,06	39	64,9	4,9	107,3	0,95	0,98
20	40	65,4	113,0	116,4	1,03		1,00	1,03	1,06	41	66,8	4,9	107,3	0,95	0,98

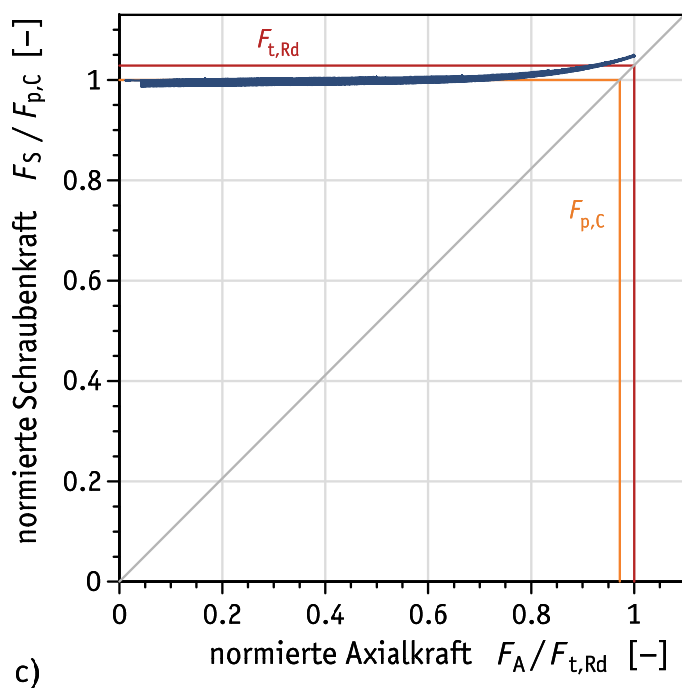
**M16 × 100 – 81 – Shr018 – H10 – Vgl – Z39**

Shr.HV | Shb.H | Shb.H | 69 | Shb.H | Mu.HV.rot



a)

b)



c)

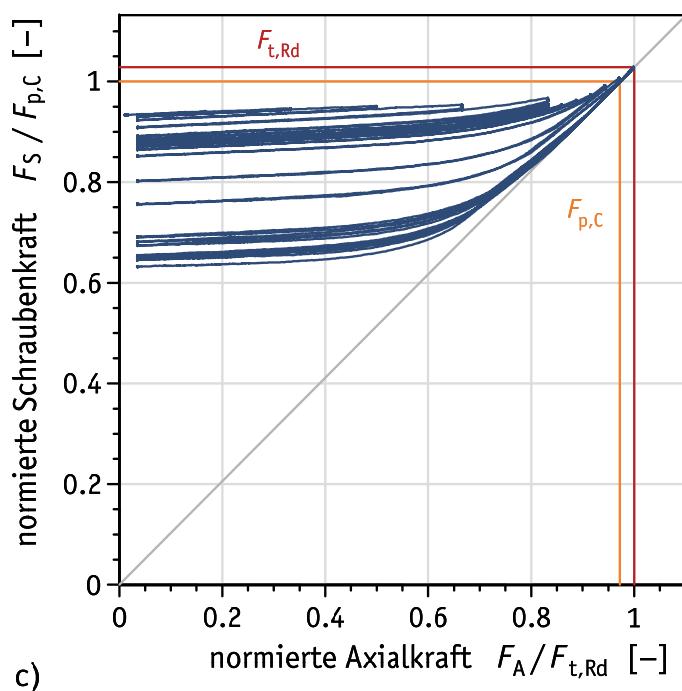
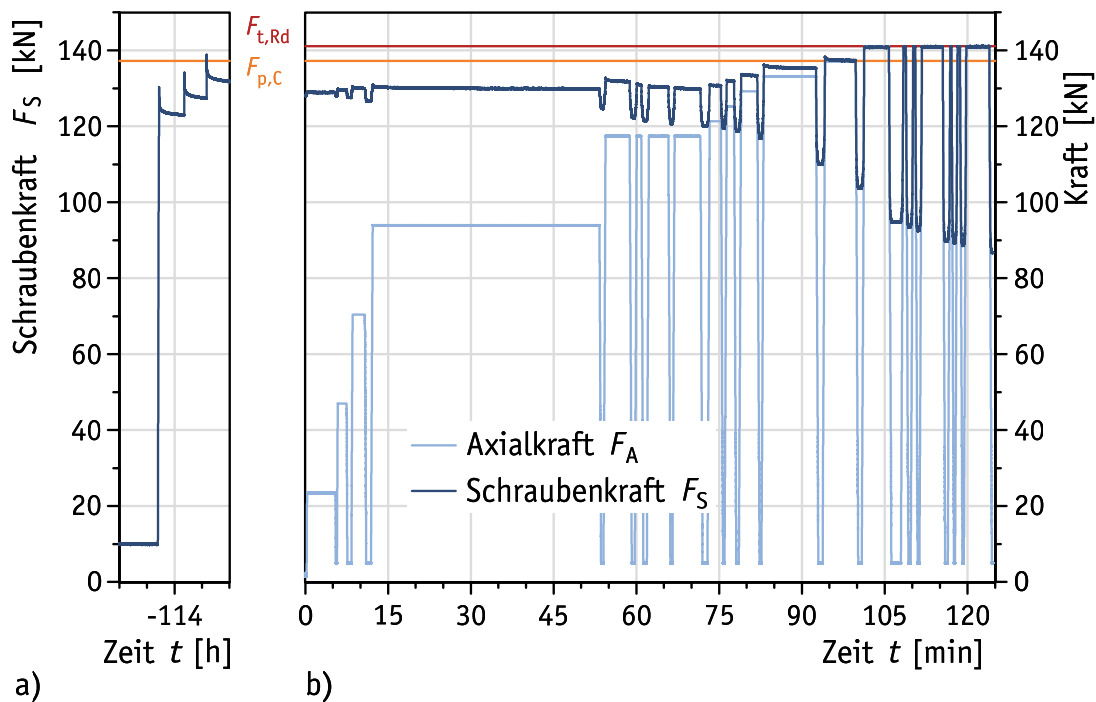
**Bild C.41.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z39 (ohne DTI)**Figure C.41.** Test results: component tensile test No. Z39 (without DTI)

**Tabelle C.64.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z39 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.64.** Test results: component tensile test No. Z39 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	Klaffen =	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M16 × 100 – 81 – Shr018 – H10 – Vgl – Z39</b>															
M	M			111,6			0,00	0,99	1,02	M			111,6	0,99	1,02
0	0		0,0	109,7			0,00	0,97	1,00	1	-0,3	0,0	109,7	0,97	1,00
1	2	0,2	18,7	110,0	5,87		0,17	0,97	1,00	3	1,4	4,9	109,7	0,97	1,00
2	4	1,6	37,6	110,2	2,93		0,33	0,98	1,00	5	2,9	4,9	109,7	0,97	1,00
3	6	3,2	56,5	110,4	1,96		0,50	0,98	1,00	7	4,5	4,9	109,6	0,97	1,00
4	8	4,8	75,3	110,8	1,47		0,67	0,98	1,01	9	36,2	4,9	109,4	0,97	1,00
5	10	36,6	94,1	111,9	1,19		0,83	0,99	1,02	11	38,0	4,9	109,2	0,97	0,99
6	12	38,5	94,1	111,8	1,19		0,83	0,99	1,02	13	39,9	4,9	109,1	0,97	0,99
7	14	40,3	94,1	111,8	1,19		0,83	0,99	1,02	15	41,8	4,9	109,1	0,97	0,99
8	16	42,2	94,1	111,8	1,19		0,83	0,99	1,02	17	43,6	4,9	109,0	0,96	0,99
9	18	44,0	97,3	112,1	1,15		0,86	0,99	1,02	19	45,5	4,9	109,0	0,96	0,99
10	20	45,9	100,4	112,5	1,12		0,89	1,00	1,02	21	47,4	4,9	109,0	0,96	0,99
11	22	47,8	103,6	113,0	1,09		0,92	1,00	1,03	23	49,3	4,9	108,9	0,96	0,99
12	24	49,7	106,7	113,6	1,06		0,94	1,01	1,03	25	51,2	4,9	108,9	0,96	0,99
13	26	51,7	109,8	114,3	1,04		0,97	1,01	1,04	27	53,2	4,9	108,9	0,96	0,99
14	28	53,7	113,0	115,3	1,02		1,00	1,02	1,05	29	55,2	4,9	108,8	0,96	0,99
15	30	55,6	113,0	115,2	1,02		1,00	1,02	1,05	31	57,1	4,9	108,7	0,96	0,99
16	32	57,6	113,0	115,2	1,02		1,00	1,02	1,05	33	59,1	4,9	108,6	0,96	0,99
17	34	59,6	113,0	115,2	1,02		1,00	1,02	1,05	35	61,1	4,9	108,6	0,96	0,99
18	36	61,6	113,0	115,2	1,02		1,00	1,02	1,05	37	63,1	4,9	108,7	0,96	0,99
19	38	63,5	113,0	115,2	1,02		1,00	1,02	1,05	39	65,0	4,9	108,6	0,96	0,99
20	40	65,5	113,0	115,1	1,02		1,00	1,02	1,05	41	67,0	4,9	108,6	0,96	0,99






**M20 × 110 – 82 – Shr001 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 9 – Z40**

Shr.HV | DTI.H8 | 75 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.42.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z40 (mit DTI)

**Figure C.42.** Test results: component tensile test No. Z40 (including DTI)

**Tabelle C.65.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z40 (mit DTI) – Anziehen**Table C.65.** Test results: component tensile test No. Z40 (including DTI) – tightening

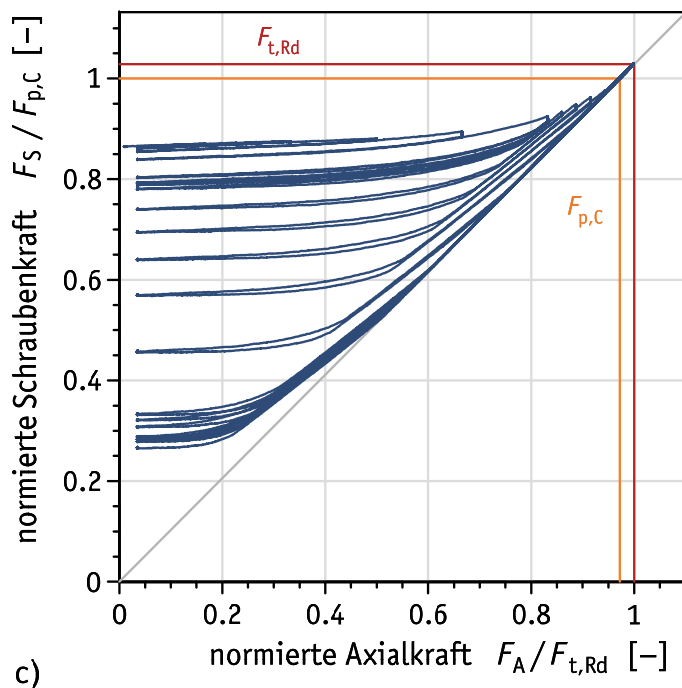
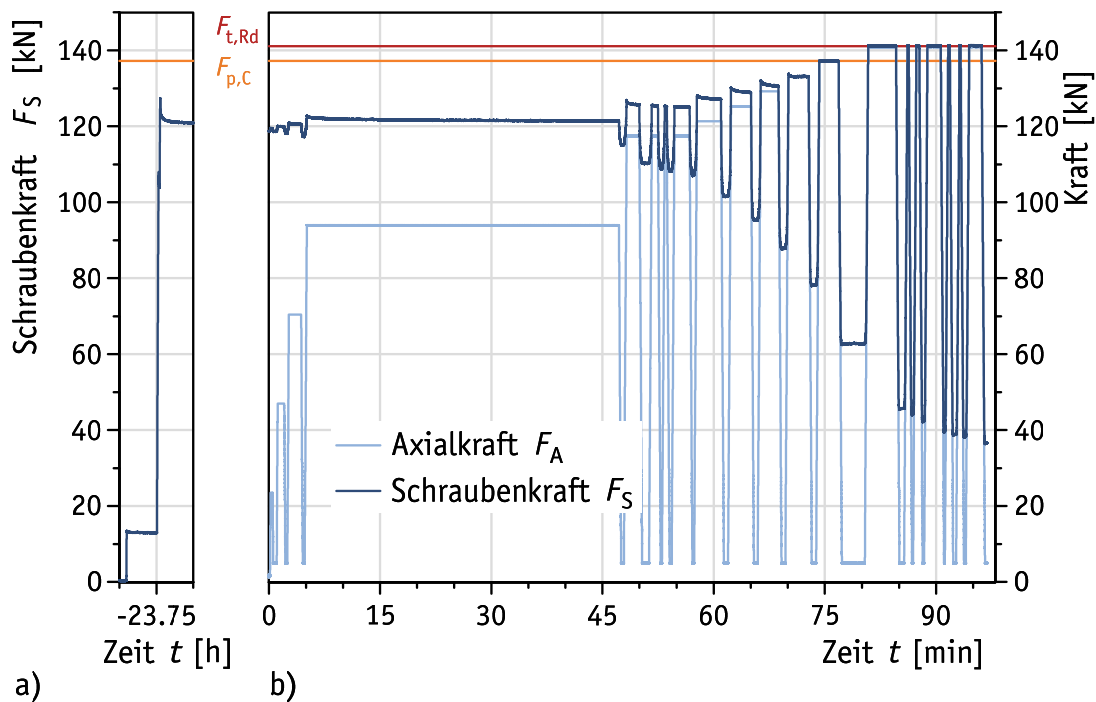
M20 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 9 – Z40					
$F_S$	[kN]		130	134	139
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,66	0,68	0,71
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,95	0,98	1,01
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,4	0,4	0,3
		2	0,45	0,4	0,35
		3	0,45	0,4	0,35
		4	0,45	0,4	0,35
		5	0,4	0,4	0,32
Fühllehre	[mm]	0,40			
$n_{refusal}$	[-]		0	0	5
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,46	0,43	0,35
$R / 2$	[mm]		±0,05	±0,03	±0,05

**Tabelle C.66.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z40 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.66.** Test results: component tensile test No. Z40 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
M20 × 110 – 82 – Shr001 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 9 – Z40															
M	M			138,8			0,00	0,98	1,01	M			138,8	0,98	1,01
0	0		0,0	128,0			0,00	0,91	0,93	1	-0,6	0,0	128,0	0,91	0,93
1	2	0,3	23,5	129,1	5,50		0,17	0,91	0,94	3	5,6	4,9	128,0	0,91	0,93
2	4	5,9	47,0	129,9	2,77		0,33	0,92	0,95	5	8,0	4,9	127,6	0,90	0,93
3	6	8,6	70,4	130,5	1,85		0,50	0,92	0,95	7	11,4	4,9	126,7	0,90	0,92
4	8	12,2	94,0	130,9	1,39		0,67	0,93	0,95	9	53,8	4,9	124,6	0,88	0,91
5	10	54,5	117,5	132,4	1,13		0,83	0,94	0,96	11	59,4	4,9	122,4	0,87	0,89
6	12	60,1	117,4	131,2	1,12		0,83	0,93	0,96	13	61,6	4,9	121,5	0,86	0,89
7	14	62,3	117,4	130,6	1,11		0,83	0,93	0,95	15	66,4	4,9	120,7	0,86	0,88
8	16	67,0	117,4	130,1	1,11		0,83	0,92	0,95	17	72,4	4,9	120,2	0,85	0,88
9	18	73,3	121,3	130,8	1,08		0,86	0,93	0,95	19	75,8	4,9	119,6	0,85	0,87
10	20	76,4	125,3	132,2	1,06		0,89	0,94	0,96	21	78,3	4,9	118,6	0,84	0,86
11	22	79,0	129,2	133,6	1,03		0,92	0,95	0,97	23	82,5	4,9	116,9	0,83	0,85
12	24	83,1	133,1	136,1	1,02		0,94	0,96	0,99	25	93,4	4,9	110,1	0,78	0,80
13	26	94,2	137,0	138,2	1,01		0,97	0,98	1,01	27	100,5	4,9	103,7	0,73	0,76
14	28	101,3	140,9	140,8	1,00	=	1,00	1,00	1,03	29	107,1	4,9	94,8	0,67	0,69
15	30	108,4	140,8	140,8	1,00	=	1,00	1,00	1,03	31	109,5	4,9	93,7	0,66	0,68
16	32	110,2	140,9	141,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	33	111,1	4,9	92,5	0,66	0,67
17	34	111,7	140,9	141,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	35	116,2	4,9	89,7	0,64	0,65
18	36	116,9	140,9	140,9	1,00	=	1,00	1,00	1,03	37	117,6	4,9	89,3	0,63	0,65
19	38	118,2	140,8	140,9	1,00	=	1,00	1,00	1,03	39	119,2	4,9	88,7	0,63	0,65
20	40	119,8	140,9	140,9	1,00	=	1,00	1,00	1,03	41	124,6	4,9	86,7	0,61	0,63

**M20 × 110 – 82 – Shr002 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 11 – Z41**

Shr.HV | DTI.H8 | 75 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.43.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z41 (mit DTI)

**Figure C.43.** Test results: component tensile test No. Z41 (including DTI)



**Tabelle C.67.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z41 (mit DTI) – Anziehen**Table C.67.** Test results: component tensile test No. Z41 (including DTI) – tightening

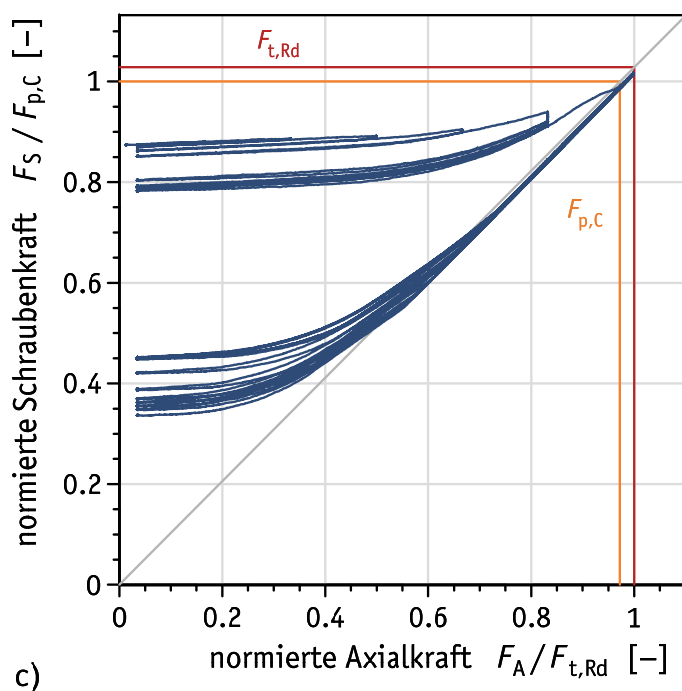
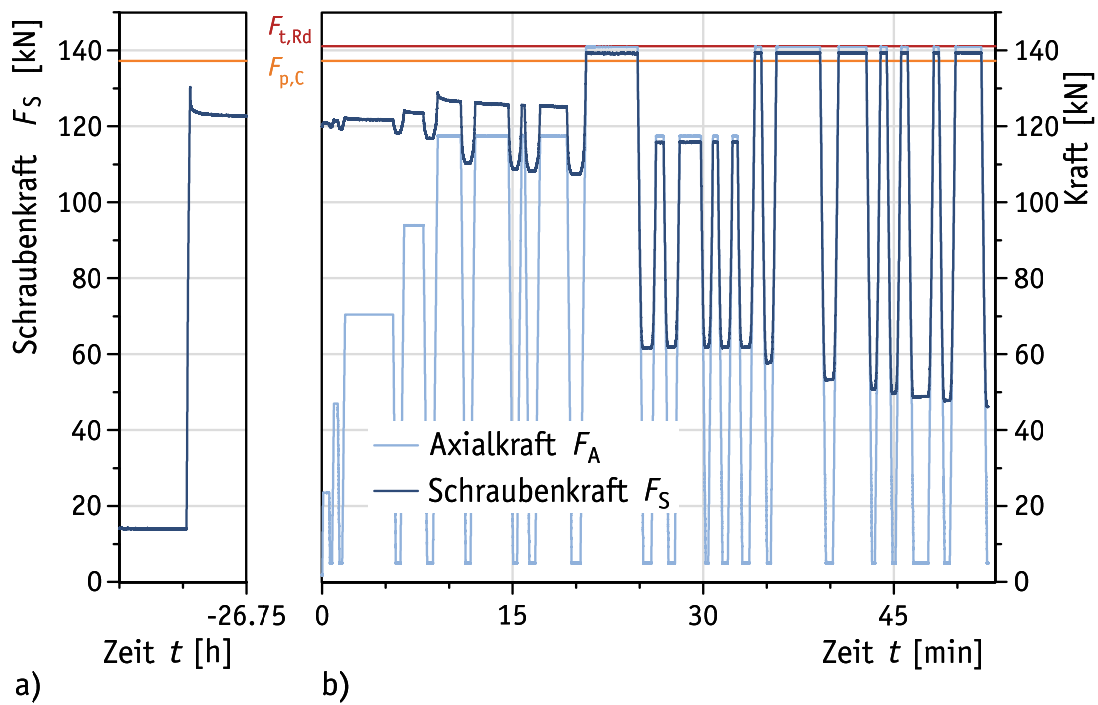
M20 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 11 – Z41				
$F_S$	[kN]			127
$F_S / F_{ub}$	[-]			0,65
$F_S / F_{p,C}$	[-]			0,93
$h_{gap,inf}$	[mm]	1		0,25
		2		0,35
		3		0,45
		4		0,45
		5		0,35
Fühllehre	[mm]	0,40		
$n_{refusal}$	[-]			3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2		0,39
$R / 2$	[mm]			±0,13

**Tabelle C.68.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z41 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.68.** Test results: component tensile test No. Z41 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
M20 × 110 – 82 – Shr002 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 11 – Z41															
M	M			127,4			0,00	0,90	0,93	M			127,4	0,90	0,93
0	0		0,1	118,6			0,00	0,84	0,86	1	-0,3	0,1	118,6	0,84	0,86
1	2	0,2	23,5	119,5	5,09		0,17	0,85	0,87	3	0,8	4,9	118,6	0,84	0,86
2	4	1,2	47,0	120,1	2,56		0,33	0,85	0,88	5	2,4	4,9	118,2	0,84	0,86
3	6	2,7	70,4	120,9	1,72		0,50	0,86	0,88	7	4,7	4,9	117,3	0,83	0,86
4	8	5,1	94,0	122,8	1,31		0,67	0,87	0,90	9	47,7	4,9	115,1	0,82	0,84
5	10	48,3	117,4	126,9	1,08		0,83	0,90	0,92	11	50,8	4,9	110,3	0,78	0,80
6	12	51,7	117,4	125,6	1,07		0,83	0,89	0,92	13	52,9	4,9	108,8	0,77	0,79
7	14	53,4	117,4	125,3	1,07		0,83	0,89	0,91	15	54,2	4,9	108,2	0,77	0,79
8	16	54,7	117,4	125,2	1,07		0,83	0,89	0,91	17	57,3	4,9	107,1	0,76	0,78
9	18	57,7	121,3	128,0	1,06		0,86	0,91	0,93	19	61,6	4,9	101,5	0,72	0,74
10	20	62,3	125,2	130,2	1,04		0,89	0,92	0,95	21	65,7	4,9	95,4	0,68	0,70
11	22	66,4	129,2	132,1	1,02		0,92	0,94	0,96	23	69,4	4,9	87,9	0,62	0,64
12	24	70,1	133,1	133,8	1,01		0,94	0,95	0,98	25	73,5	4,9	78,1	0,55	0,57
13	26	74,3	137,0	137,2	1,00	=	0,97	0,97	1,00	27	78,9	4,9	62,9	0,45	0,46
14	28	80,8	140,9	141,1	1,00	=	1,00	1,00	1,03	29	85,4	4,9	45,6	0,32	0,33
15	30	86,1	140,9	141,2	1,00	=	1,00	1,00	1,03	31	86,8	4,9	44,1	0,31	0,32
16	32	87,4	140,9	141,3	1,00	=	1,00	1,00	1,03	33	88,3	4,9	42,3	0,30	0,31
17	34	88,8	140,9	141,3	1,00	=	1,00	1,00	1,03	35	91,1	4,9	39,6	0,28	0,29
18	36	91,6	140,9	141,2	1,00	=	1,00	1,00	1,03	37	92,5	4,9	38,9	0,28	0,28
19	38	93,2	140,9	141,3	1,00	=	1,00	1,00	1,03	39	93,9	4,9	38,2	0,27	0,28
20	40	94,5	140,9	141,2	1,00	=	1,00	1,00	1,03	41	96,9	4,9	36,6	0,26	0,27

**M20 × 110 – 82 – Shr005 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 12 – Z42**

Shr.HV | DTI.H8 | 75 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.44.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z42 (mit DTI)

**Figure C.44.** Test results: component tensile test No. Z42 (including DTI)

**Tabelle C.69.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z42 (mit DTI) – Anziehen**Table C.69.** Test results: component tensile test No. Z42 (including DTI) – tightening

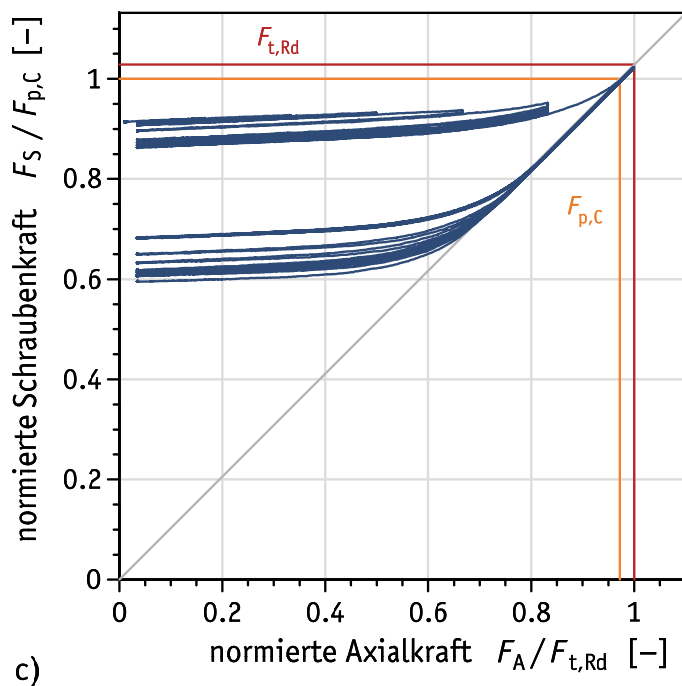
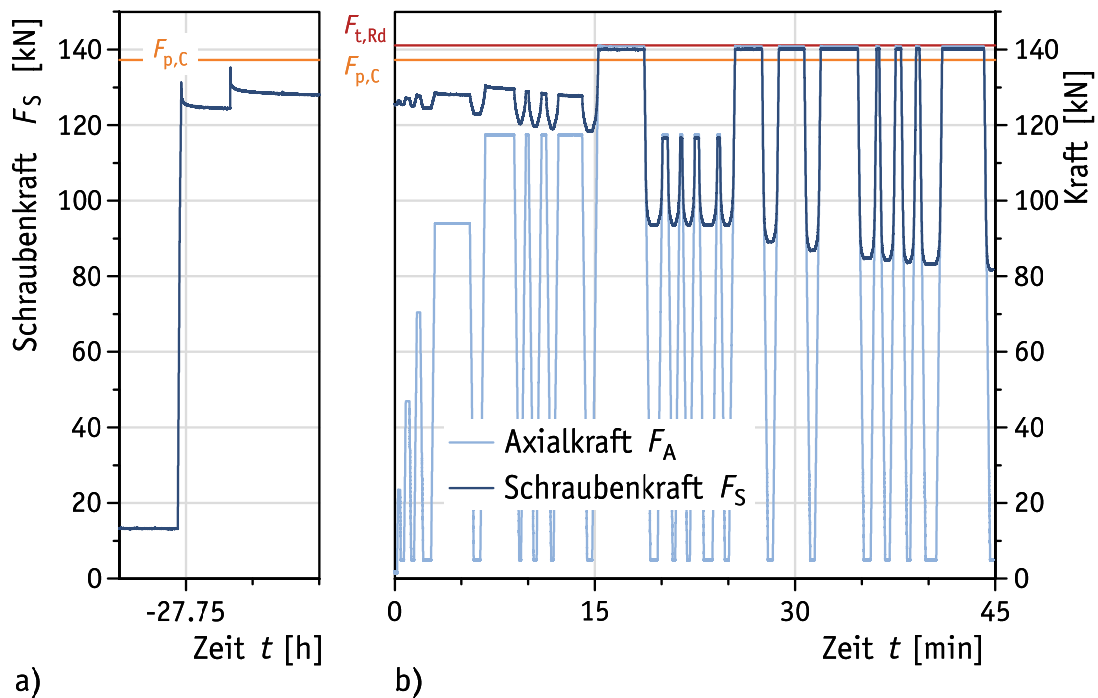
M20 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 12 – Z42				
$F_S$	[kN]			130
$F_S / F_{ub}$	[-]			0,66
$F_S / F_{p,C}$	[-]			0,95
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,35	
		2	0,32	
		3	0,25	
		4	0,32	
		5	0,4	
Fühllehre	[mm]	0,40		
$n_{refusal}$	[-]		4	
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,35	
$R / 2$	[mm]		±0,1	

**Tabelle C.70.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z42 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.70.** Test results: component tensile test No. Z42 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
M20 × 110 – 82 – Shr005 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 12 – Z42															
M	M			130,3			0,00	0,92	0,95	M			130,3	0,92	0,95
0	0		0,1	119,9			0,00	0,85	0,87	1	-0,1	0,1	119,9	0,85	0,87
1	2	0,1	23,5	120,8	5,15		0,17	0,86	0,88	3	0,7	4,9	120,0	0,85	0,87
2	4	0,9	47,0	121,6	2,59		0,33	0,86	0,89	5	1,5	4,9	119,4	0,85	0,87
3	6	1,8	70,4	122,3	1,74		0,50	0,87	0,89	7	6,0	4,9	118,4	0,84	0,86
4	8	6,5	94,0	124,1	1,32		0,67	0,88	0,90	9	8,5	4,9	116,8	0,83	0,85
5	10	9,1	117,4	128,9	1,10		0,83	0,91	0,94	11	11,5	4,9	110,2	0,78	0,80
6	12	12,1	117,4	126,3	1,08		0,83	0,90	0,92	13	15,2	4,9	108,7	0,77	0,79
7	14	15,7	117,4	125,5	1,07		0,83	0,89	0,91	15	16,6	4,9	108,2	0,77	0,79
8	16	17,2	117,4	125,4	1,07		0,83	0,89	0,91	17	20,0	4,9	107,5	0,76	0,78
9	18	20,8	140,9	139,4	0,99	=	1,00	0,99	1,02	19	25,7	4,9	61,7	0,44	0,45
10	20	26,3	117,4	115,8	0,99	=	0,83	0,82	0,84	21	27,6	4,9	61,8	0,44	0,45
11	22	28,2	117,4	115,9	0,99	=	0,83	0,82	0,84	23	30,3	4,9	61,9	0,44	0,45
12	24	30,8	117,4	115,8	0,99	=	0,83	0,82	0,84	25	31,7	4,9	61,8	0,44	0,45
13	26	32,3	117,4	115,8	0,99	=	0,83	0,82	0,84	27	33,3	4,9	61,8	0,44	0,45
14	28	34,1	140,9	139,5	0,99	=	1,00	0,99	1,02	29	35,2	4,9	57,8	0,41	0,42
15	30	35,8	140,9	139,3	0,99	=	1,00	0,99	1,02	31	39,9	4,9	53,3	0,38	0,39
16	32	40,7	140,9	139,3	0,99	=	1,00	0,99	1,02	33	43,4	4,9	50,7	0,36	0,37
17	34	44,0	140,9	139,4	0,99	=	1,00	0,99	1,02	35	45,0	4,9	49,7	0,35	0,36
18	36	45,6	140,9	139,4	0,99	=	1,00	0,99	1,02	37	47,2	4,9	48,9	0,35	0,36
19	38	48,2	140,9	139,5	0,99	=	1,00	0,99	1,02	39	49,2	4,9	47,9	0,34	0,35
20	40	49,9	140,9	139,4	0,99	=	1,00	0,99	1,02	41	52,4	4,9	46,2	0,33	0,34



**M20 × 110 – 82 – Shr001 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 13 – Z43**

Shr.HV | DTI.H8 | 75 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.45.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z43 (mit DTI)

**Figure C.45.** Test results: component tensile test No. Z43 (including DTI)

**Tabelle C.71.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z43 (mit DTI) – Anziehen**Table C.71.** Test results: component tensile test No. Z43 (including DTI) – tightening

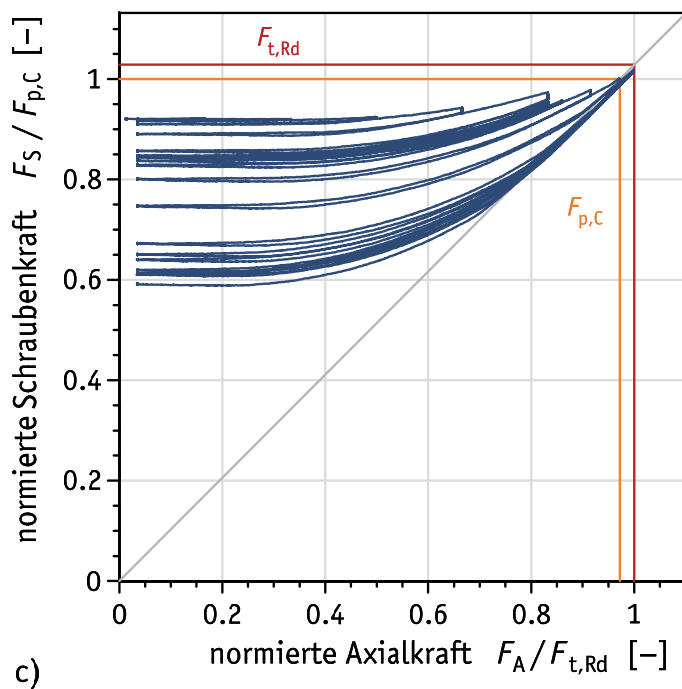
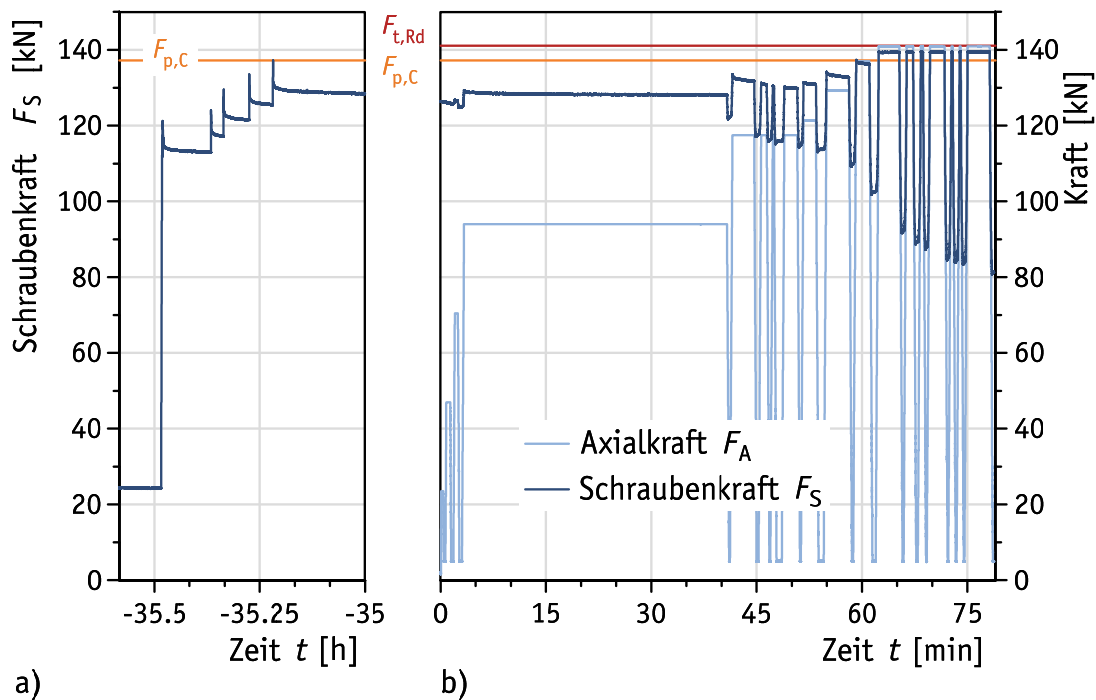
M20 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 13 – Z43				
$F_S$	[kN]		131	135
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,67	0,69
$F_S / F_{p,C}$	[-]		0,96	0,99
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,35	0,32
		2	0,35	0,32
		3	0,4	0,35
		4	0,4	0,35
		5	0,4	0,35
Fühllehre	[mm]	0,40		
$n_{refusal}$	[-]		2	5
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,41	0,36
$R / 2$	[mm]		±0,05	±0,04

**Tabelle C.72.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z43 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.72.** Test results: component tensile test No. Z43 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
[min]			[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]	[min]		[kN]	[kN]	[-]	[-]
M20 × 110 – 82 – Shr001 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 13 – Z43															
M	M			135,2			0,00	0,96	0,99	M			135,2	0,96	0,99
0	0		0,0	125,2			0,00	0,89	0,91	1	-0,8	0,0	125,2	0,89	0,91
1	2	0,3	23,5	126,4	5,38		0,17	0,90	0,92	3	0,6	4,9	125,5	0,89	0,91
2	4	0,8	47,0	127,3	2,71		0,33	0,90	0,93	5	1,3	4,9	125,0	0,89	0,91
3	6	1,7	70,4	127,9	1,82		0,50	0,91	0,93	7	2,5	4,9	124,5	0,88	0,91
4	8	3,0	93,9	128,6	1,37		0,67	0,91	0,94	9	6,2	4,9	123,0	0,87	0,90
5	10	6,8	117,4	130,6	1,11		0,83	0,93	0,95	11	9,4	4,9	120,5	0,85	0,88
6	12	9,8	117,4	128,9	1,10		0,83	0,91	0,94	13	10,5	4,9	119,7	0,85	0,87
7	14	11,0	117,4	128,4	1,09		0,83	0,91	0,94	15	11,8	4,9	119,0	0,84	0,87
8	16	12,3	117,4	128,0	1,09		0,83	0,91	0,93	17	14,6	4,9	118,5	0,84	0,86
9	18	15,3	140,9	139,9	0,99	=	1,00	0,99	1,02	19	19,4	4,9	93,6	0,66	0,68
10	20	20,1	117,4	116,5	0,99	=	0,83	0,83	0,85	21	20,9	4,9	93,6	0,66	0,68
11	22	21,4	117,4	116,5	0,99	=	0,83	0,83	0,85	23	22,0	4,9	93,7	0,66	0,68
12	24	22,5	117,4	116,6	0,99	=	0,83	0,83	0,85	25	23,5	4,9	93,7	0,66	0,68
13	26	24,2	117,4	116,6	0,99	=	0,83	0,83	0,85	27	24,9	4,9	93,5	0,66	0,68
14	28	25,5	140,9	140,0	0,99	=	1,00	0,99	1,02	29	28,2	4,9	89,2	0,63	0,65
15	30	28,8	140,9	140,2	0,99	=	1,00	0,99	1,02	31	31,3	4,9	86,9	0,62	0,63
16	32	31,9	140,9	140,1	0,99	=	1,00	0,99	1,02	33	35,4	4,9	84,8	0,60	0,62
17	34	36,1	140,9	140,1	0,99	=	1,00	0,99	1,02	35	36,9	4,9	84,3	0,60	0,61
18	36	37,6	140,9	140,0	0,99	=	1,00	0,99	1,02	37	38,5	4,9	83,7	0,59	0,61
19	38	39,1	140,9	140,2	1,00	=	1,00	0,99	1,02	39	40,2	4,9	83,3	0,59	0,61
20	40	41,0	140,9	140,1	0,99	=	1,00	0,99	1,02	41	44,8	4,9	81,8	0,58	0,60







**M20 × 80 – 53 – Shr002 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 17 – Z44**

Shr.HV | DTI.H8 | 46 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.46.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z44 (mit DTI)

**Figure C.46.** Test results: component tensile test No. Z44 (including DTI)

**Tabelle C.73.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z44 (mit DTI) – Anziehen**Table C.73.** Test results: component tensile test No. Z44 (including DTI) – tightening

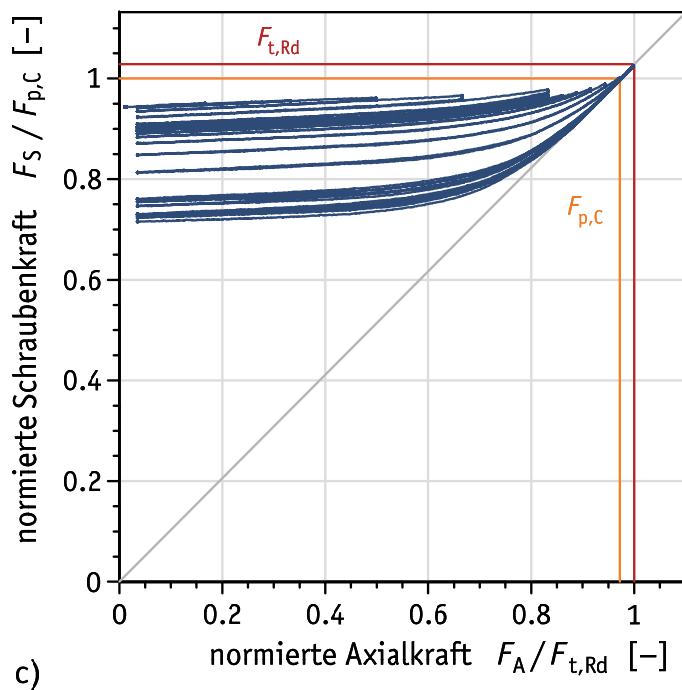
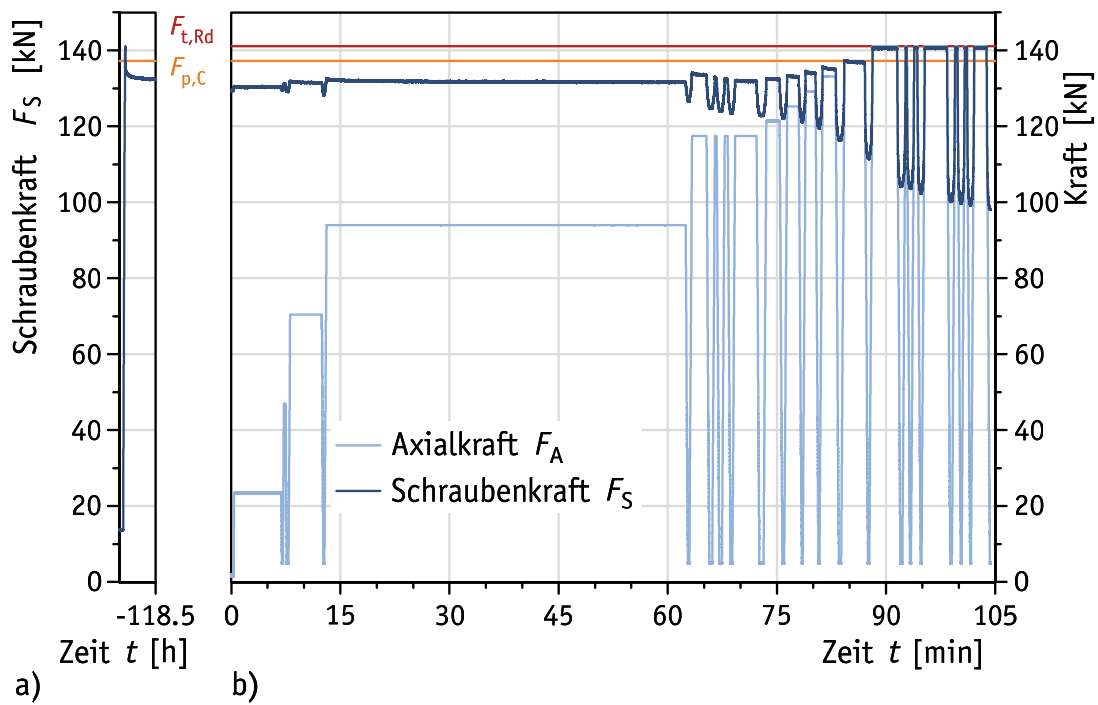
M20 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 17 – Z44							
$F_S$	[kN]		121	124	130	133	137
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,62	0,63	0,66	0,68	0,7
$F_S / F_{p,C}$	[-]		0,88	0,9	0,94	0,97	1,0
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,5	0,5	0,4	0,4	0,35
		2	0,5	0,5	0,4	0,35	0,35
		3	0,5	0,5	0,45	0,4	0,35
		4	0,6	0,6	0,5	0,45	0,4
		5	0,6	0,6	0,55	0,45	0,4
Fühllehre	[mm]	0,40					
$n_{refusal}$	[-]		0	0	0	1	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,57	0,57	0,49	0,44	0,4
$R / 2$	[mm]		±0,08	±0,08	±0,1	±0,08	±0,05

**Tabelle C.74.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z44 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.74.** Test results: component tensile test No. Z44 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]	=	[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M20 × 80 – 53 – Shr002 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 17 – Z44															
M	M			137,3			0,00	0,97	1,00	M			137,3	0,97	1,00
0	0		0,1	126,3			0,00	0,89	0,92	1	-0,1	0,1	126,3	0,89	0,92
1	2	0,1	23,5	126,4	5,39		0,17	0,90	0,92	3	0,6	4,9	126,1	0,89	0,92
2	4	0,8	47,0	126,2	2,69		0,33	0,89	0,92	5	1,7	4,9	125,7	0,89	0,92
3	6	2,0	70,5	126,8	1,80		0,50	0,90	0,92	7	2,9	4,9	125,0	0,89	0,91
4	8	3,4	94,0	129,3	1,38		0,67	0,92	0,94	9	41,1	4,9	122,2	0,87	0,89
5	10	41,6	117,5	133,5	1,14		0,83	0,95	0,97	11	45,1	4,9	117,6	0,83	0,86
6	12	45,7	117,5	131,2	1,12		0,83	0,93	0,96	13	46,9	4,9	116,3	0,82	0,85
7	14	47,3	117,5	130,5	1,11		0,83	0,92	0,95	15	48,2	4,9	115,8	0,82	0,84
8	16	49,0	117,5	130,2	1,11		0,83	0,92	0,95	17	51,3	4,9	114,9	0,81	0,84
9	18	51,7	121,4	131,3	1,08		0,86	0,93	0,96	19	54,2	4,9	113,7	0,81	0,83
10	20	55,0	129,2	134,2	1,04		0,92	0,95	0,98	21	58,6	4,9	109,9	0,78	0,80
11	22	59,2	137,0	137,4	1,00		0,97	0,97	1,00	23	61,7	4,9	102,4	0,73	0,75
12	24	62,4	140,9	139,6	0,99	=	1,00	0,99	1,02	25	65,9	4,9	92,3	0,65	0,67
13	26	66,4	140,9	139,5	0,99	=	1,00	0,99	1,02	27	67,8	4,9	89,2	0,63	0,65
14	28	68,4	140,9	139,5	0,99	=	1,00	0,99	1,02	29	69,2	4,9	87,8	0,62	0,64
15	30	69,7	140,9	139,3	0,99	=	1,00	0,99	1,02	31	72,2	4,9	85,0	0,60	0,62
16	32	72,7	140,9	139,4	0,99	=	1,00	0,99	1,02	33	73,4	4,9	84,3	0,60	0,61
17	34	73,9	140,9	139,4	0,99	=	1,00	0,99	1,02	35	74,5	4,9	83,8	0,59	0,61
18	36	75,1	140,9	139,5	0,99	=	1,00	0,99	1,02	37	78,8	4,9	81,4	0,58	0,59

**M20 × 110 – 82 – Shr001 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 14 – Z45**

Shr.HV | DTI.H8 | 75 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.47.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z45 (mit DTI)

**Figure C.47.** Test results: component tensile test No. Z45 (including DTI)



**Tabelle C.75.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z45 (mit DTI) – Anziehen**Table C.75.** Test results: component tensile test No. Z45 (including DTI) – tightening

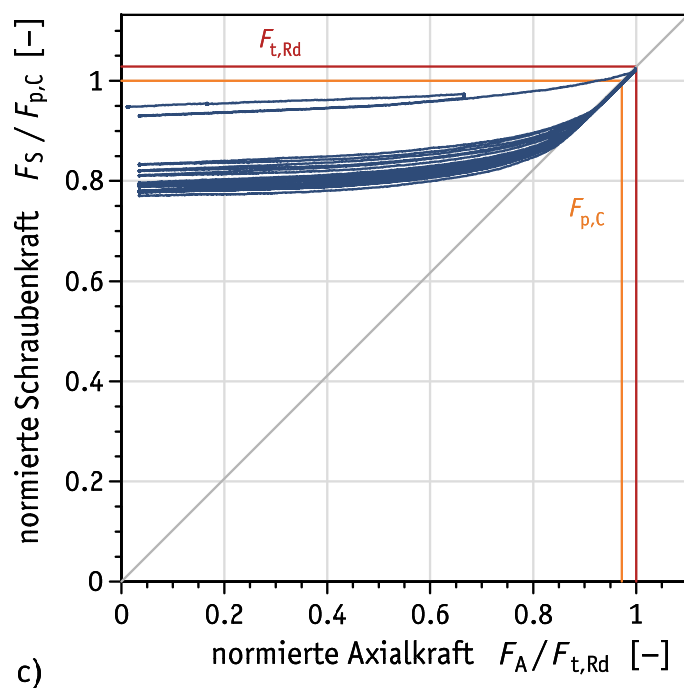
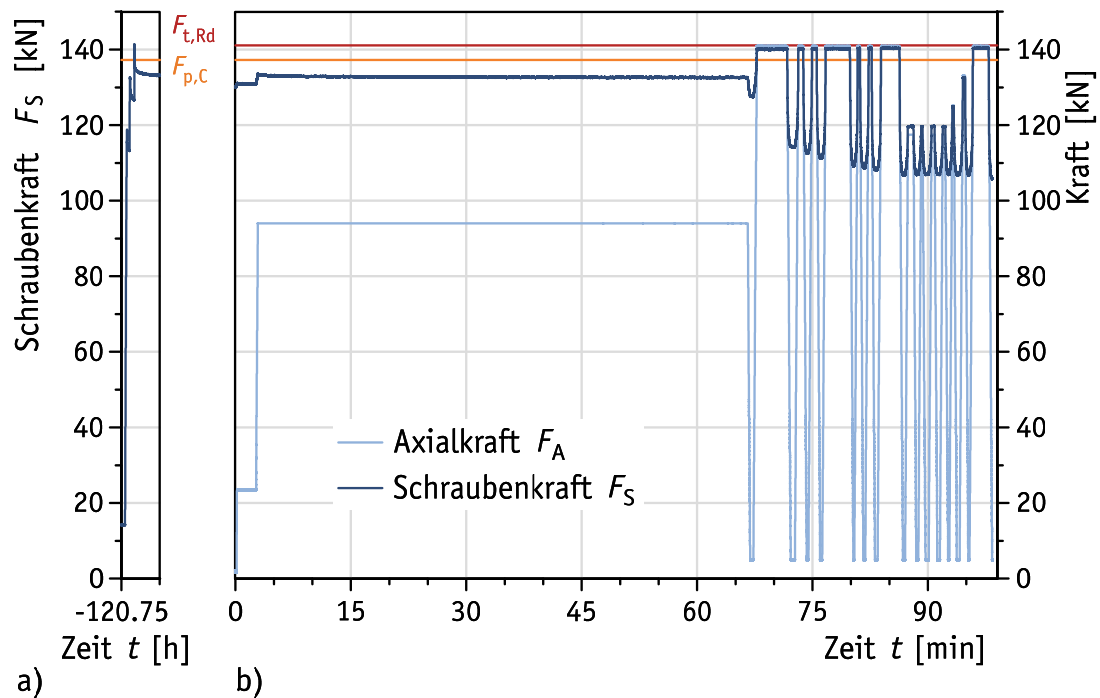
M20 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 14 – Z45			
$F_S$	[kN]	141	
$F_S / F_{ub}$	[-]	0,72	
$F_S / F_{p,C}$	[-]	1,03	
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,25
		2	0,32
		3	0,32
		4	0,3
		5	0,28
Fühllehre	[mm]	0,40	
$n_{refusal}$	[-]	5	
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,31
$R / 2$	[mm]		±0,05

**Tabelle C.76.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z45 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.76.** Test results: component tensile test No. Z45 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M20 × 110 – 82 – Shr001 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 14 – Z45															
M	M			141,0			0,00	1,00	1,03	M			141,0	1,00	1,03
0	0		0,0	129,3			0,00	0,92	0,94	1	-0,3	0,0	129,3	0,92	0,94
1	2	0,4	23,5	130,3	5,55		0,17	0,92	0,95	3	7,0	5,1	129,6	0,92	0,94
2	4	7,2	47,0	131,3	2,80		0,33	0,93	0,96	5	7,7	5,1	129,2	0,92	0,94
3	6	8,1	70,5	132,0	1,87		0,50	0,94	0,96	7	12,7	5,1	128,3	0,91	0,94
4	8	13,1	94,0	132,6	1,41		0,67	0,94	0,97	9	62,9	5,1	126,6	0,90	0,92
5	10	63,3	117,5	134,2	1,14		0,83	0,95	0,98	11	65,9	5,1	124,7	0,88	0,91
6	12	66,5	117,5	133,1	1,13		0,83	0,94	0,97	13	67,3	5,1	124,1	0,88	0,90
7	14	67,8	117,5	132,5	1,13		0,83	0,94	0,97	15	68,8	5,1	123,6	0,88	0,90
8	16	69,3	117,5	132,0	1,12		0,83	0,94	0,96	17	72,9	5,1	122,9	0,87	0,90
9	18	73,6	121,4	132,6	1,09		0,86	0,94	0,97	19	75,9	5,1	122,2	0,87	0,89
10	20	76,4	125,3	133,4	1,07		0,89	0,95	0,97	21	78,5	5,1	121,2	0,86	0,88
11	22	79,0	129,2	134,4	1,04		0,92	0,95	0,98	23	80,8	5,1	119,6	0,85	0,87
12	24	81,3	133,1	135,7	1,02		0,94	0,96	0,99	25	83,7	5,1	116,4	0,83	0,85
13	26	84,3	137,0	137,3	1,00	=	0,97	0,97	1,00	27	87,6	5,1	111,6	0,79	0,81
14	28	88,2	140,9	140,6	1,00	=	1,00	1,00	1,02	29	92,1	5,1	104,4	0,74	0,76
15	30	92,7	140,9	140,5	1,00	=	1,00	1,00	1,02	31	93,4	5,1	103,6	0,73	0,76
16	32	93,9	140,9	140,6	1,00	=	1,00	1,00	1,02	33	94,8	5,1	102,5	0,73	0,75
17	34	95,3	140,9	140,5	1,00	=	1,00	1,00	1,02	35	98,9	5,1	100,3	0,71	0,73
18	36	99,5	140,9	140,6	1,00	=	1,00	1,00	1,03	37	100,3	4,9	99,7	0,71	0,73
19	38	100,9	140,9	140,7	1,00	=	1,00	1,00	1,03	39	101,6	4,9	99,2	0,70	0,72
20	40	102,1	140,9	140,7	1,00	=	1,00	1,00	1,03	41	104,4	4,9	98,0	0,69	0,71

**M20 × 110 – 82 – Shr002 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 15 – Z46**

Shr.HV | DTI.H8 | 75 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.48.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z46 (mit DTI)

**Figure C.48.** Test results: component tensile test No. Z46 (including DTI)

**Tabelle C.77.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z46 (mit DTI) – Anziehen**Table C.77.** Test results: component tensile test No. Z46 (including DTI) – tightening

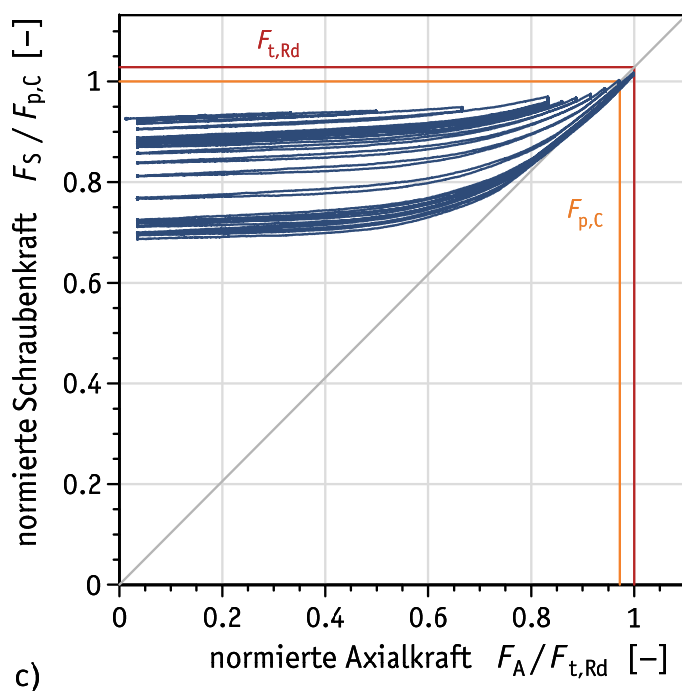
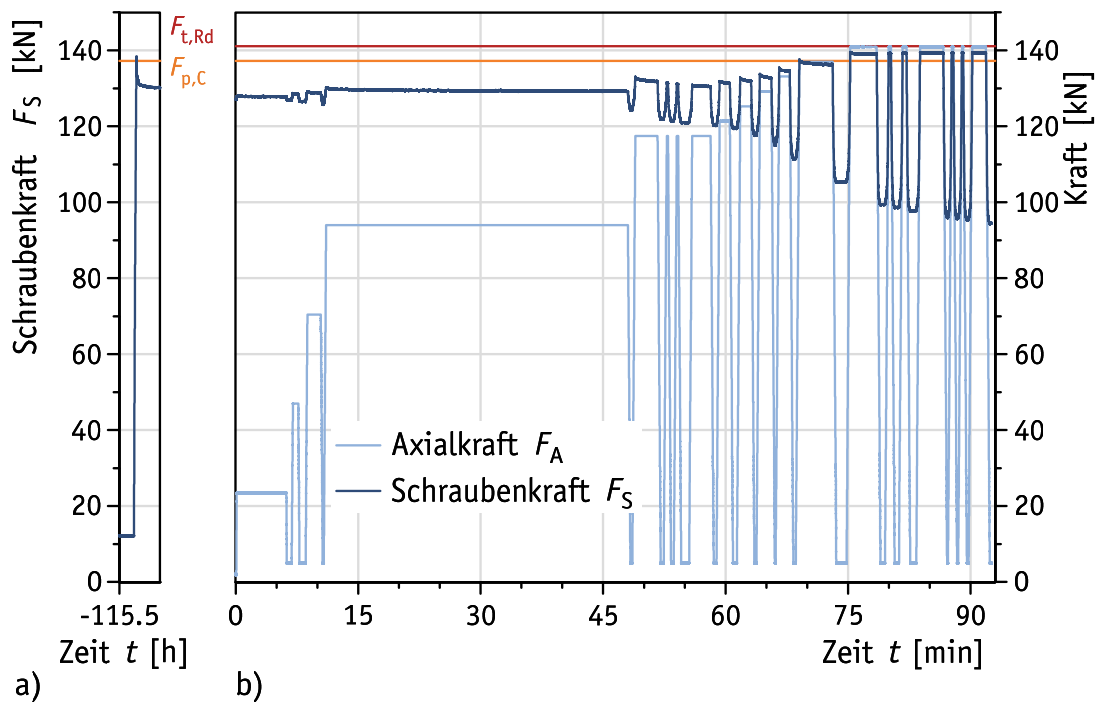
M20 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 15 – Z46			
$F_S$	[kN]		141
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,72
$F_S / F_{p,C}$	[-]		1,03
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,15
		2	0,22
		3	0,22
		4	0,2
		5	0,15
Fühllehre	[mm]	0,40	
$n_{refusal}$	[-]		5
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,2
$R/2$	[mm]		±0,05

**Tabelle C.78.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z46 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.78.** Test results: component tensile test No. Z46 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
M20 × 110 – 82 – Shr002 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 15 – Z46															
M	M			141,4			0,00	1,00	1,03	M			141,4	1,00	1,03
0	0		0,1	130,1			0,00	0,92	0,95	1	-0,1	0,1	130,1	0,92	0,95
1	2	0,2	23,4	131,0	5,59		0,17	0,93	0,95	3	2,7	23,4	130,8	0,93	0,95
2	4	2,9	94,0	133,6	1,42		0,67	0,95	0,97	5	67,1	4,9	127,6	0,90	0,93
3	6	67,8	141,0	140,1	0,99	=	1,00	0,99	1,02	7	72,5	4,9	114,4	0,81	0,83
4	8	73,2	140,9	140,1	0,99	=	1,00	0,99	1,02	9	74,4	4,9	112,6	0,80	0,82
5	10	74,9	140,9	140,1	0,99	=	1,00	0,99	1,02	11	76,2	4,9	111,2	0,79	0,81
6	12	76,7	140,9	140,3	1,00	=	1,00	0,99	1,02	13	80,4	4,9	109,3	0,77	0,80
7	14	80,9	140,9	140,2	1,00	=	1,00	0,99	1,02	15	81,8	4,9	108,7	0,77	0,79
8	16	82,3	140,9	140,2	0,99	=	1,00	0,99	1,02	17	83,3	4,9	108,2	0,77	0,79
9	18	83,9	140,9	140,3	1,00	=	1,00	0,99	1,02	19	86,9	4,9	106,8	0,76	0,78
10	20	87,4	117,5	119,5	1,02		0,83	0,85	0,87	21	88,6	4,9	106,9	0,76	0,78
11	22	89,1	117,5	119,6	1,02		0,83	0,85	0,87	23	89,9	4,9	107,0	0,76	0,78
12	24	90,5	117,5	119,6	1,02		0,83	0,85	0,87	25	91,4	4,9	106,9	0,76	0,78
13	26	91,9	117,5	119,6	1,02		0,83	0,85	0,87	27	92,7	4,9	107,0	0,76	0,78
14	28	93,2	125,2	124,8	1,00	=	0,89	0,88	0,91	29	93,9	4,9	106,9	0,76	0,78
15	30	94,6	133,1	132,6	1,00	=	0,94	0,94	0,97	31	95,3	4,9	106,8	0,76	0,78
16	32	95,9	140,9	140,3	1,00	=	1,00	0,99	1,02	33	98,4	4,9	105,8	0,75	0,77

**M20 × 110 – 82 – Shr005 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 16 – Z47**

Shr.HV | DTI.H8 | 75 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.49.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z47 (mit DTI)

**Figure C.49.** Test results: component tensile test No. Z47 (including DTI)

**Tabelle C.79.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z47 (mit DTI) – Anziehen**Table C.79.** Test results: component tensile test No. Z47 (including DTI) – tightening

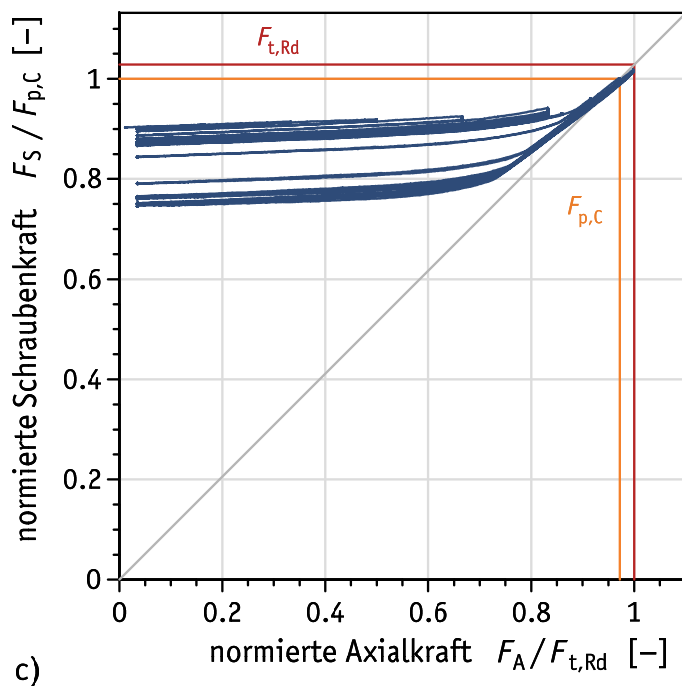
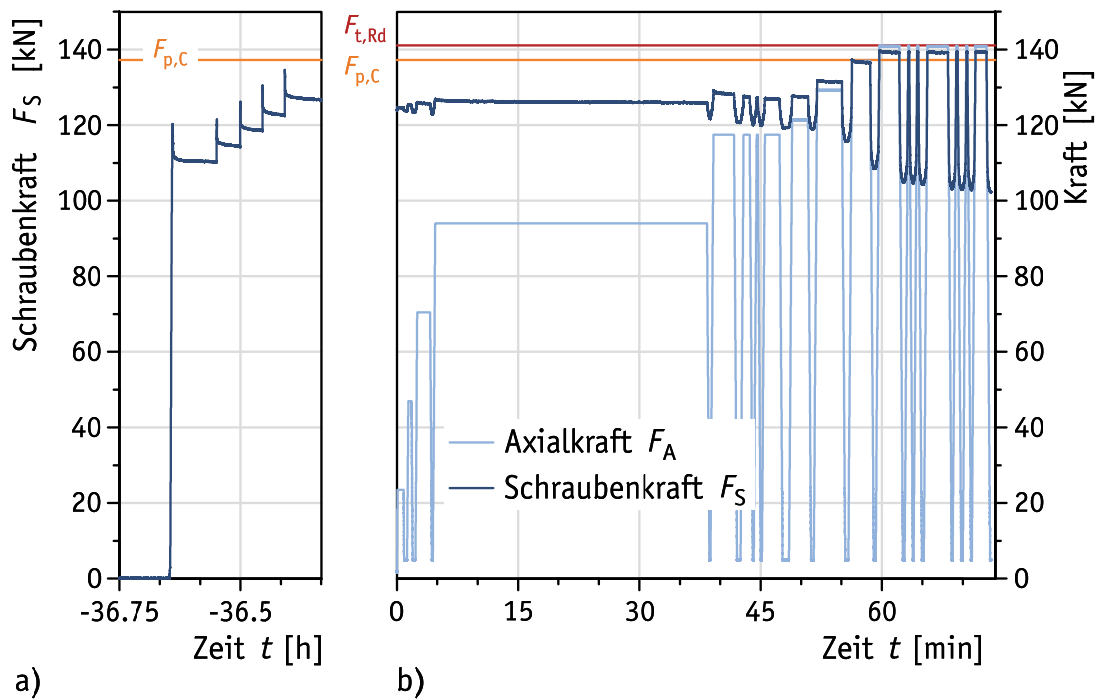
M20 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 16 – Z47			
$F_S$	[kN]	138	
$F_S / F_{ub}$	[-]	0,71	
$F_S / F_{p,C}$	[-]	1,01	
$h_{gap,inf}$	1	0,18	
	2	0,2	
	3	0,2	
	4	0,22	
	5	0,22	
Fühllehre	[mm]	0,40	
$n_{refusal}$	[-]	5	
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,22
$R / 2$	[mm]		±0,04

**Tabelle C.80.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z47 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.80.** Test results: component tensile test No. Z47 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M20 × 110 – 82 – Shr005 – H8 – AND-A2 – Shr.fix – 16 – Z47															
M	M			138,5			0,00	0,98	1,01	M			138,5	0,98	1,01
0	0		0,0	127,0			0,00	0,90	0,93	1	-0,7	0,0	127,0	0,90	0,93
1	2	0,1	23,5	127,8	5,43		0,17	0,91	0,93	3	6,6	4,9	127,0	0,90	0,93
2	4	7,0	47,0	128,8	2,74		0,33	0,91	0,94	5	8,2	4,9	126,6	0,90	0,92
3	6	8,8	70,5	129,2	1,83		0,50	0,92	0,94	7	10,7	4,9	125,7	0,89	0,92
4	8	11,1	94,0	130,2	1,39		0,67	0,92	0,95	9	48,4	4,9	124,2	0,88	0,91
5	10	48,9	117,5	133,0	1,13		0,83	0,94	0,97	11	52,2	4,9	121,9	0,86	0,89
6	12	52,8	117,5	131,5	1,12		0,83	0,93	0,96	13	53,5	4,9	121,3	0,86	0,88
7	14	54,0	117,5	131,3	1,12		0,83	0,93	0,96	15	55,1	4,9	120,9	0,86	0,88
8	16	55,9	117,5	130,9	1,11		0,83	0,93	0,95	17	58,7	4,9	120,4	0,85	0,88
9	18	59,3	121,3	131,8	1,09		0,86	0,93	0,96	19	61,2	4,9	119,5	0,85	0,87
10	20	61,8	125,2	132,7	1,06		0,89	0,94	0,97	21	63,7	4,9	117,6	0,83	0,86
11	22	64,2	129,2	133,8	1,04		0,92	0,95	0,98	23	66,1	4,9	115,1	0,82	0,84
12	24	66,6	133,1	135,4	1,02		0,94	0,96	0,99	25	68,5	4,9	111,5	0,79	0,81
13	26	69,0	137,0	137,4	1,00		0,97	0,97	1,00	27	74,2	4,9	105,4	0,75	0,77
14	28	75,3	140,9	139,5	0,99	=	1,00	0,99	1,02	29	79,2	4,9	99,4	0,70	0,72
15	30	80,0	140,9	139,2	0,99	=	1,00	0,99	1,01	31	81,0	4,9	98,6	0,70	0,72
16	32	81,7	140,9	139,2	0,99	=	1,00	0,99	1,01	33	82,9	4,9	97,7	0,69	0,71
17	34	83,8	140,9	139,3	0,99	=	1,00	0,99	1,02	35	87,2	4,9	96,0	0,68	0,70
18	36	87,7	140,9	139,3	0,99	=	1,00	0,99	1,02	37	88,4	4,9	95,7	0,68	0,70
19	38	88,9	140,9	139,3	0,99	=	1,00	0,99	1,02	39	89,6	4,9	95,4	0,68	0,70
20	40	90,2	140,9	139,4	0,99	=	1,00	0,99	1,02	41	92,6	4,9	94,6	0,67	0,69








**M20 × 110 – 86 – Shr005 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 18 – Z48**

Shr.HV | Shb.H | 75 | DTI.H8 | Shb.HN | Mu.HV.rot


**Bild C.50.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z48 (mit DTI)

**Figure C.50.** Test results: component tensile test No. Z48 (including DTI)

**Tabelle C.81.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z48 (mit DTI) – Anziehen**Table C.81.** Test results: component tensile test No. Z48 (including DTI) – tightening

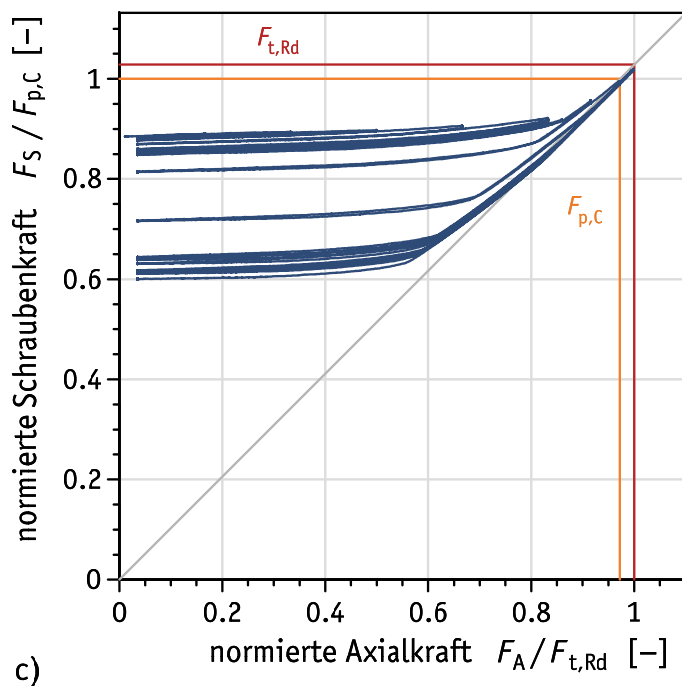
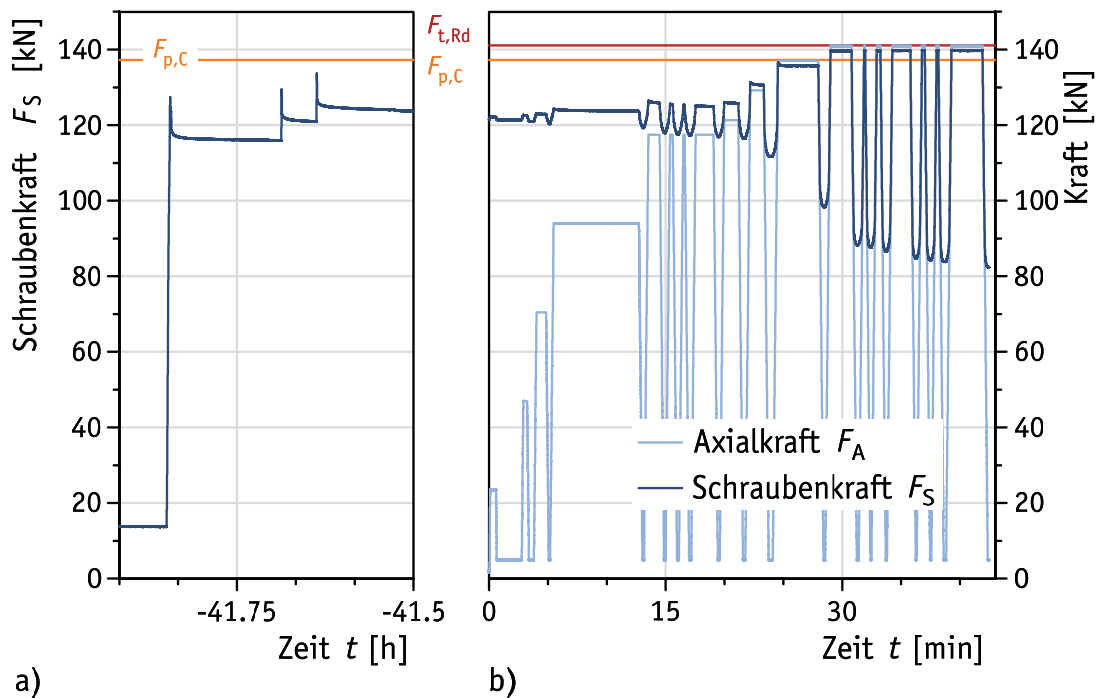
M20 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 18 – Z48							
$F_S$	[kN]		120	121	126	131	135
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,61	0,62	0,64	0,67	0,69
$F_S / F_{p,C}$	[-]		0,88	0,89	0,92	0,95	0,98
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,4	0,35	0,28	0,2	0,125
		2	0,45	0,4	0,4	0,35	0,3
		3	0,5	0,45	0,4	0,4	0,35
		4	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2
		5	0,35	0,3	0,22	0,15	0,08
Fühllehre	[mm]	0,25					
$n_{refusal}$	[-]		0	0	1	2	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,45	0,39	0,34	0,29	0,22
$R / 2$	[mm]		±0,1	±0,1	±0,12	±0,15	±0,16

**Tabelle C.82.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z48 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.82.** Test results: component tensile test No. Z48 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
[min]			[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]	[min]		[kN]	[kN]	[-]	[-]
M20 × 110 – 86 – Shr005 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 18 – Z48															
M	M			134,6			0,00	0,95	0,98	M			134,6	0,95	0,98
0	0		0,0	123,8			0,00	0,88	0,90	1	-0,3	0,0	123,8	0,88	0,90
1	2	0,1	23,5	124,7	5,31		0,17	0,88	0,91	3	1,1	4,9	123,7	0,88	0,90
2	4	1,4	47,0	125,4	2,67		0,33	0,89	0,91	5	2,1	4,9	123,5	0,88	0,90
3	6	2,5	70,4	126,0	1,79		0,50	0,89	0,92	7	4,4	4,9	122,9	0,87	0,90
4	8	4,8	94,0	127,0	1,35		0,67	0,90	0,93	9	38,7	4,9	121,7	0,86	0,89
5	10	39,2	117,5	129,2	1,10		0,83	0,92	0,94	11	42,3	4,9	120,7	0,86	0,88
6	12	42,9	117,5	127,7	1,09		0,83	0,90	0,93	13	44,1	4,9	120,2	0,85	0,88
7	14	44,5	117,5	127,2	1,08		0,83	0,90	0,93	15	45,1	4,9	119,9	0,85	0,87
8	16	45,5	117,5	127,0	1,08		0,83	0,90	0,93	17	48,1	4,9	119,4	0,85	0,87
9	18	48,9	121,4	127,6	1,05		0,86	0,90	0,93	19	51,4	4,9	119,0	0,84	0,87
10	20	52,0	129,2	131,8	1,02		0,92	0,93	0,96	21	55,7	4,9	115,8	0,82	0,84
11	22	56,3	137,0	137,4	1,00		0,97	0,97	1,00	23	59,1	4,9	108,7	0,77	0,79
12	24	59,7	140,9	139,7	0,99	=	1,00	0,99	1,02	25	62,7	4,9	105,0	0,74	0,77
13	26	63,3	140,9	139,3	0,99	=	1,00	0,99	1,01	27	63,9	4,9	104,6	0,74	0,76
14	28	64,4	140,9	139,4	0,99	=	1,00	0,99	1,02	29	65,1	4,9	104,4	0,74	0,76
15	30	65,6	140,9	139,3	0,99	=	1,00	0,99	1,02	31	68,7	4,9	103,2	0,73	0,75
16	32	69,2	140,9	139,2	0,99	=	1,00	0,99	1,01	33	69,9	4,9	102,9	0,73	0,75
17	34	70,5	140,9	139,3	0,99	=	1,00	0,99	1,02	35	71,1	4,9	102,9	0,73	0,75
18	36	71,6	140,9	139,3	0,99	=	1,00	0,99	1,02	37	73,5	4,9	102,3	0,72	0,75

**M20 × 110 – 86 – Shr002 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 24 – Z49**






Shr.HV | Shb.H | 75 | DTI.H8 | Shb.HN | Mu.HV.rot


**Bild C.51.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z49 (mit DTI)

**Figure C.51.** Test results: component tensile test No. Z49 (including DTI)



**Tabelle C.83.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z49 (mit DTI) – Anziehen**Table C.83.** Test results: component tensile test No. Z49 (including DTI) – tightening

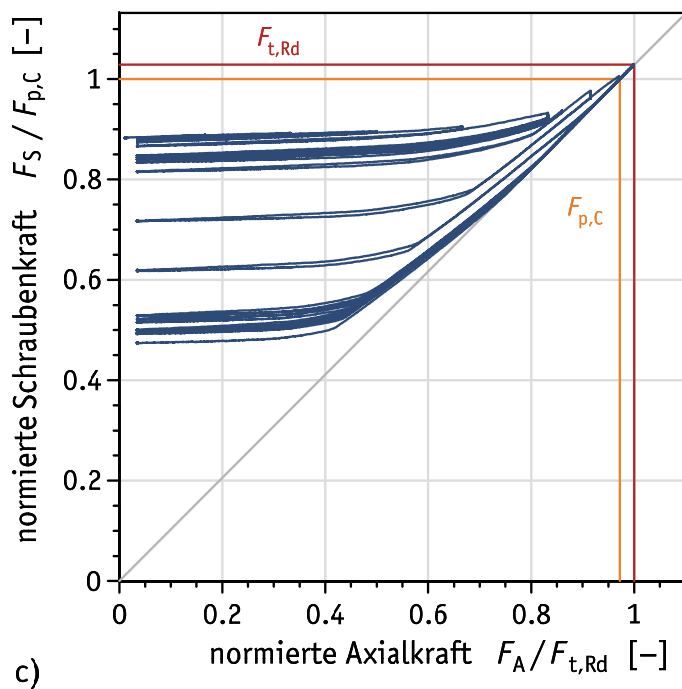
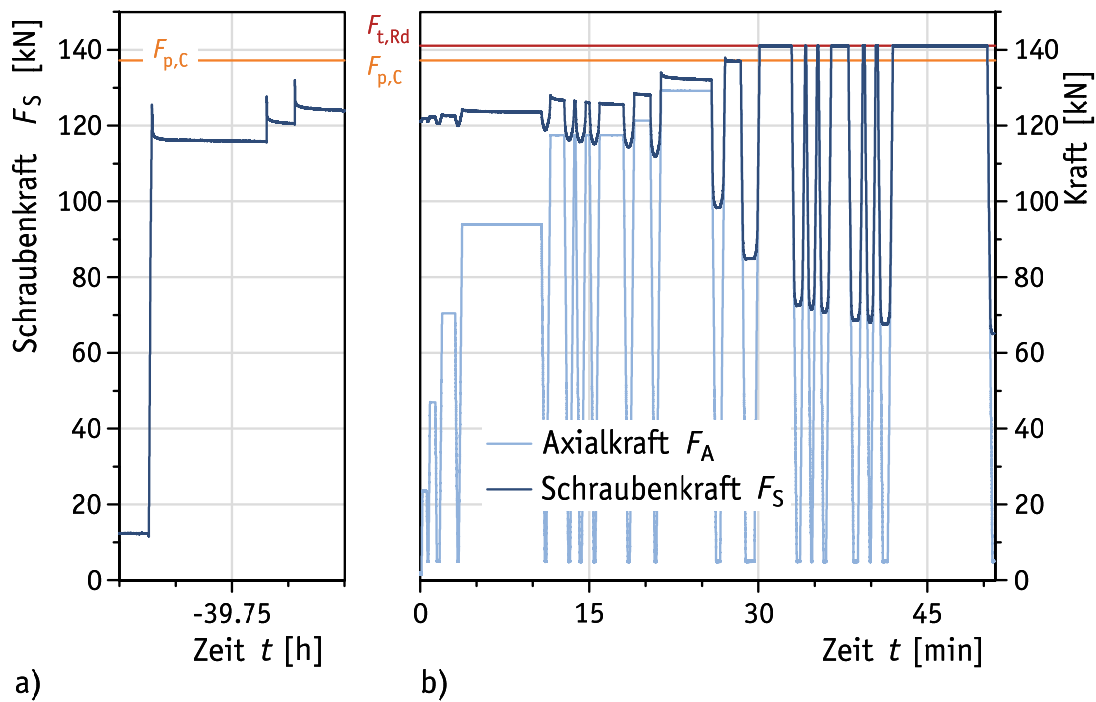
M20 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 24 – Z49					
$F_S$	[kN]		127	129	134
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,65	0,66	0,68
$F_S / F_{p,C}$	[-]		0,93	0,94	0,97
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,3	0,25	0,18
		2	0,15	0,1	0,05
		3	0,1	0,075	0
		4	0,4	0,4	0,35
		5	0,45	0,4	0,35
Fühllehre	[mm]	0,25			
$n_{refusal}$	[-]		2	2	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,3	0,26	0,2
$R / 2$	[mm]		±0,2	±0,19	±0,2

**Tabelle C.84.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z49 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.84.** Test results: component tensile test No. Z49 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
[min]			[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]	[min]		[kN]	[kN]	[-]	[-]
M20 × 110 – 86 – Shr002 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 24 – Z49															
M	M			133,6			0,00	0,95	0,97	M			133,6	0,95	0,97
0	0		0,0	121,3			0,00	0,86	0,88	1	-0,6	0,0	121,3	0,86	0,88
1	2	0,1	23,6	122,2	5,18		0,17	0,87	0,89	3	1,8	4,9	121,4	0,86	0,88
2	4	2,9	47,0	122,6	2,61		0,33	0,87	0,89	5	3,6	4,9	121,0	0,86	0,88
3	6	4,0	70,4	123,1	1,75		0,50	0,87	0,90	7	5,1	4,9	120,3	0,85	0,88
4	8	5,5	94,0	124,3	1,32		0,67	0,88	0,91	9	13,1	4,9	119,3	0,85	0,87
5	10	13,5	117,4	126,5	1,08		0,83	0,90	0,92	11	14,9	4,9	117,9	0,84	0,86
6	12	15,4	117,4	125,6	1,07		0,83	0,89	0,92	13	16,1	4,9	117,5	0,83	0,86
7	14	16,5	117,4	125,4	1,07		0,83	0,89	0,91	15	17,1	4,9	117,3	0,83	0,86
8	16	17,6	117,4	125,2	1,07		0,83	0,89	0,91	17	19,5	4,9	116,9	0,83	0,85
9	18	20,0	121,3	126,1	1,04		0,86	0,89	0,92	19	21,7	4,9	116,5	0,83	0,85
10	20	22,2	129,2	131,3	1,02		0,92	0,93	0,96	21	23,9	4,9	111,7	0,79	0,81
11	22	24,5	137,0	136,6	1,00	=	0,97	0,97	1,00	23	28,5	4,9	98,3	0,70	0,72
12	24	29,0	140,9	139,5	0,99	=	1,00	0,99	1,02	25	31,3	4,9	88,3	0,63	0,64
13	26	31,9	140,9	139,7	0,99	=	1,00	0,99	1,02	27	32,4	4,9	87,6	0,62	0,64
14	28	32,9	140,9	139,7	0,99	=	1,00	0,99	1,02	29	33,7	4,9	86,6	0,61	0,63
15	30	34,3	140,9	139,7	0,99	=	1,00	0,99	1,02	31	36,3	4,9	84,7	0,60	0,62
16	32	36,8	140,9	139,8	0,99	=	1,00	0,99	1,02	33	37,5	4,9	84,2	0,60	0,61
17	34	38,0	140,9	139,7	0,99	=	1,00	0,99	1,02	35	38,7	4,9	83,8	0,59	0,61
18	36	39,3	140,9	139,7	0,99	=	1,00	0,99	1,02	37	42,5	4,9	82,4	0,58	0,60






**M20 × 110 – 86 – Shr001 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 25 – Z50**

Shr.HV | Shb.H | 75 | DTI.H8 | Shb.HN | Mu.HV.rot


**Bild C.52.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z50 (mit DTI)

**Figure C.52.** Test results: component tensile test No. Z50 (including DTI)

**Tabelle C.85.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z50 (mit DTI) – Anziehen**Table C.85.** Test results: component tensile test No. Z50 (including DTI) – tightening

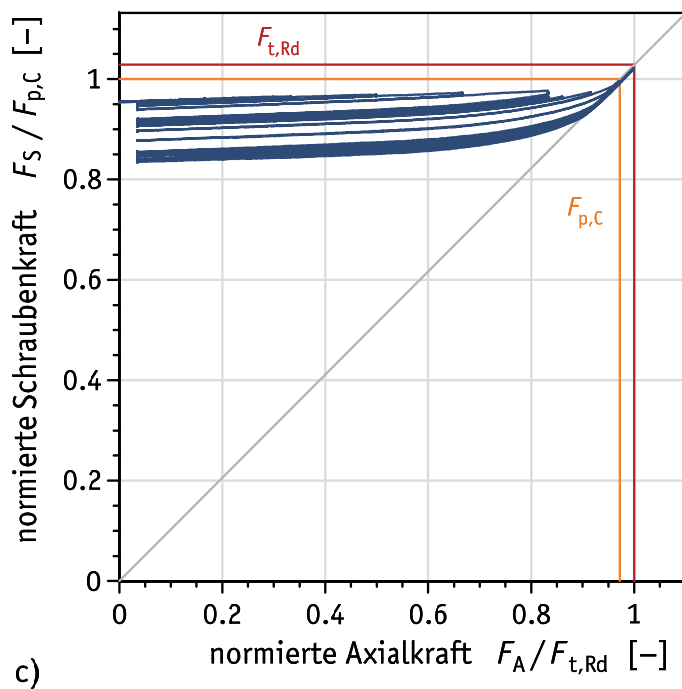
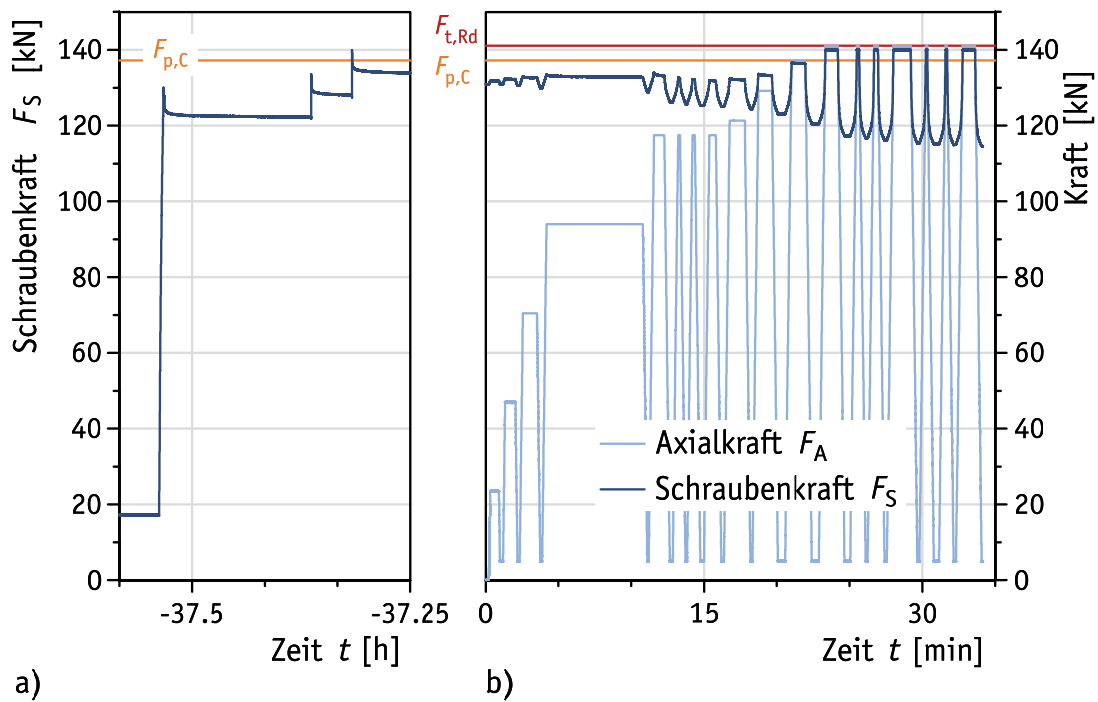
M20 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 25 – Z50					
$F_S$	[kN]		125	128	132
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,64	0,65	0,67
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,91	0,93	0,96
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,25	0,2	0,15
		2	0,22	0,15	0,12
		3	0,28	0,25	0,18
		4	0,45	0,4	0,4
		5	0,4	0,4	0,35
Fühllehre	[mm]	0,25			
$n_{refusal}$	[-]		1	2	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,34	0,3	0,26
$R / 2$	[mm]		±0,14	±0,15	±0,17

**Tabelle C.86.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z50 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.86.** Test results: component tensile test No. Z50 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
		[min]	[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M20 × 110 – 86 – Shr001 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 25 – Z50															
M	M			132,0			0,00	0,94	0,96	M			132,0	0,94	0,96
0	0		0,1	121,1			0,00	0,86	0,88	1	-0,2	0,1	121,1	0,86	0,88
1	2	0,2	23,5	121,9	5,19		0,17	0,86	0,89	3	0,7	4,9	121,1	0,86	0,88
2	4	0,9	47,1	122,4	2,60		0,33	0,87	0,89	5	1,6	4,9	120,5	0,85	0,88
3	6	2,0	70,5	123,0	1,75		0,50	0,87	0,90	7	3,4	4,9	119,9	0,85	0,87
4	8	3,7	94,0	124,3	1,32		0,67	0,88	0,91	9	11,1	4,9	118,9	0,84	0,87
5	10	11,6	117,4	127,9	1,09		0,83	0,91	0,93	11	13,2	4,9	116,3	0,82	0,85
6	12	13,7	117,5	126,5	1,08		0,83	0,90	0,92	13	14,2	4,9	115,8	0,82	0,84
7	14	14,7	117,5	126,2	1,07		0,83	0,89	0,92	15	15,5	4,9	115,2	0,82	0,84
8	16	15,9	117,4	125,9	1,07		0,83	0,89	0,92	17	18,5	4,9	114,4	0,81	0,83
9	18	19,0	121,4	128,5	1,06		0,86	0,91	0,94	19	20,9	4,9	111,8	0,79	0,82
10	20	21,4	129,2	133,9	1,04		0,92	0,95	0,98	21	26,4	4,9	98,5	0,70	0,72
11	22	27,1	137,0	137,8	1,01		0,97	0,98	1,00	23	29,3	4,9	84,9	0,60	0,62
12	24	30,1	140,9	141,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	25	33,6	4,9	72,5	0,51	0,53
13	26	34,2	140,9	141,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	27	34,7	4,9	71,6	0,51	0,52
14	28	35,2	140,9	141,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	29	35,9	4,9	70,7	0,50	0,52
15	30	36,5	140,9	141,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	31	38,6	4,9	68,6	0,49	0,50
16	32	39,3	140,9	141,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	33	39,9	4,9	68,1	0,48	0,50
17	34	40,4	140,9	141,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	35	41,3	4,9	67,7	0,48	0,49
18	36	41,9	140,9	141,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	37	50,9	4,9	65,2	0,46	0,48






**M20 × 110 – 86 – Shr005 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 26 – Z51**

Shr.HV | Shb.H | 75 | DTI.H8 | Shb.HN | Mu.HV.rot


**Bild C.53.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z51 (mit DTI)

**Figure C.53.** Test results: component tensile test No. Z51 (including DTI)

**Tabelle C.87.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z51 (mit DTI) – Anziehen**Table C.87.** Test results: component tensile test No. Z51 (including DTI) – tightening

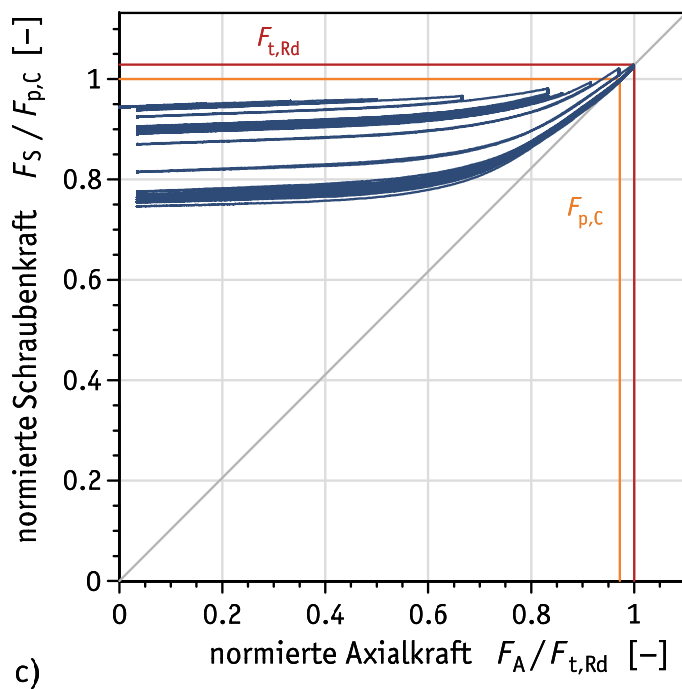
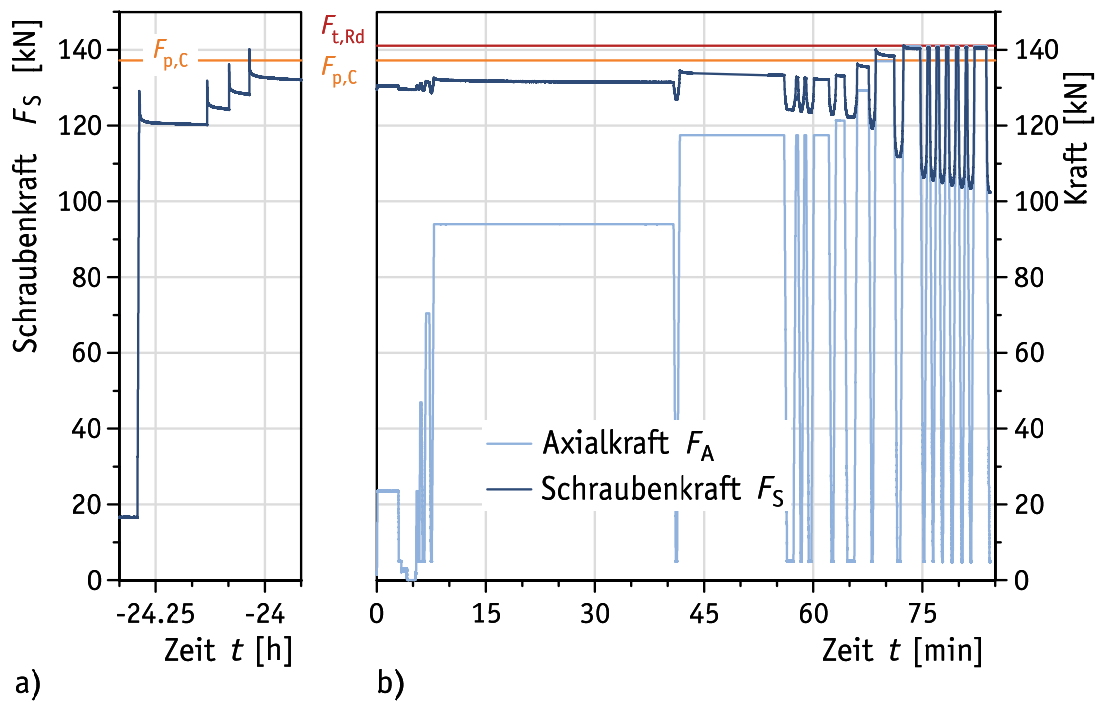
M20 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 26 – Z51					
$F_S$	[kN]		130	134	140
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,66	0,68	0,71
$F_S / F_{p,c}$	[-]		0,95	0,97	1,02
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,3	0,25	0,2
		2	0,05	0	0
		3	0	0	0
		4	0,25	0,25	0,2
		5	0,35	0,32	0,25
Fühllehre	[mm]	0,25			
$n_{refusal}$	[-]		2	2	4
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,2	0,18	0,14
$R / 2$	[mm]		±0,2	±0,18	±0,14

**Tabelle C.88.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z51 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.88.** Test results: component tensile test No. Z51 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)					
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,max}$	$F_S = F_{S,max}$	$F_S / F_A$	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$	Laststufe Nr.	Zeit $t$	$F_A = F_{A,min}$	$F_S = F_{S,min}$	$F_S / F_{t,Rd}$	$F_S / F_{p,C}$
[min]			[kN]	[kN]	[-]		[-]	[-]	[-]		[min]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
M20 × 110 – 86 – Shr005 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 26 – Z51															
M	M			139,9			0,00	0,99	1,02	M			139,9	0,99	1,02
0	0		0,0	130,8			0,00	0,93	0,95	1	-0,2	0,0	130,8	0,93	0,95
1	2	0,3	23,5	131,8	5,62		0,17	0,93	0,96	3	1,1	4,9	131,0	0,93	0,95
2	4	1,3	47,0	132,5	2,82		0,33	0,94	0,97	5	2,3	4,9	130,5	0,92	0,95
3	6	2,6	70,5	132,9	1,89		0,50	0,94	0,97	7	3,8	4,9	129,9	0,92	0,95
4	8	4,2	94,0	133,4	1,42		0,67	0,95	0,97	9	11,1	4,9	128,8	0,91	0,94
5	10	11,6	117,4	134,0	1,14		0,83	0,95	0,98	11	12,8	4,9	126,2	0,89	0,92
6	12	13,2	117,4	132,7	1,13		0,83	0,94	0,97	13	13,8	4,9	125,6	0,89	0,92
7	14	14,2	117,4	132,3	1,13		0,83	0,94	0,96	15	14,9	4,9	125,3	0,89	0,91
8	16	15,4	117,4	131,9	1,12		0,83	0,93	0,96	17	16,3	4,9	125,0	0,89	0,91
9	18	16,8	121,3	132,4	1,09		0,86	0,94	0,96	19	18,3	4,9	124,3	0,88	0,91
10	20	18,7	129,2	133,6	1,03		0,92	0,95	0,97	21	20,3	4,9	123,0	0,87	0,90
11	22	21,0	137,0	136,6	1,00	=	0,97	0,97	1,00	23	22,6	4,9	120,4	0,85	0,88
12	24	23,3	140,9	139,9	0,99	=	1,00	0,99	1,02	25	24,9	4,9	117,3	0,83	0,86
13	26	25,5	140,9	139,9	0,99	=	1,00	0,99	1,02	27	26,2	5,0	116,7	0,83	0,85
14	28	26,7	140,9	140,0	0,99	=	1,00	0,99	1,02	29	27,5	4,9	116,1	0,82	0,85
15	30	28,0	140,9	140,0	0,99	=	1,00	0,99	1,02	31	29,7	4,9	115,3	0,82	0,84
16	32	30,3	140,9	140,0	0,99	=	1,00	0,99	1,02	33	31,0	4,9	115,2	0,82	0,84
17	34	31,6	140,9	140,0	0,99	=	1,00	0,99	1,02	35	32,2	5,0	115,0	0,81	0,84
18	36	32,8	140,9	140,0	0,99	=	1,00	0,99	1,02	37	34,2	4,9	114,6	0,81	0,84







**M20 × 110 – 86 – Shr002 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 27 – Z52**

Shr.HV | Shb.H | 75 | DTI.H8 | Shb.HN | Mu.HV.rot


**Bild C.54.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z52 (mit DTI)

**Figure C.54.** Test results: component tensile test No. Z52 (including DTI)

**Tabelle C.89.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z52 (mit DTI) – Anziehen**Table C.89.** Test results: component tensile test No. Z52 (including DTI) – tightening

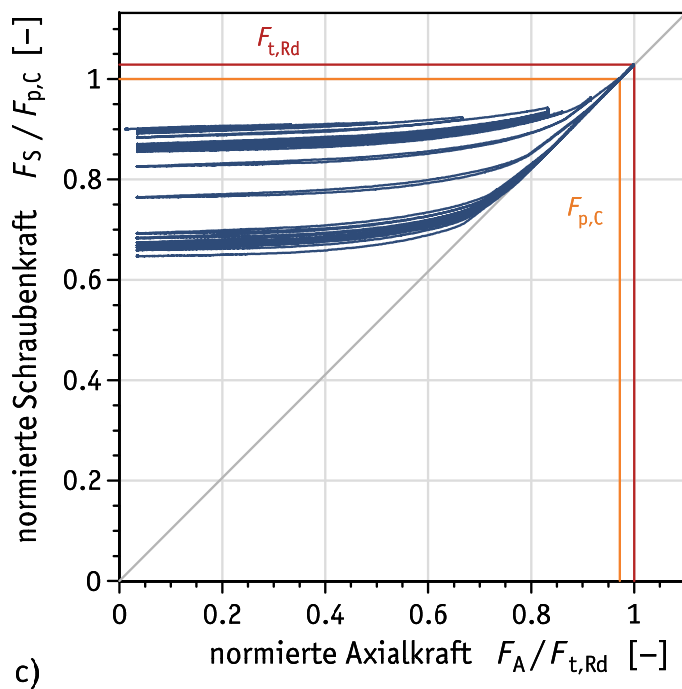
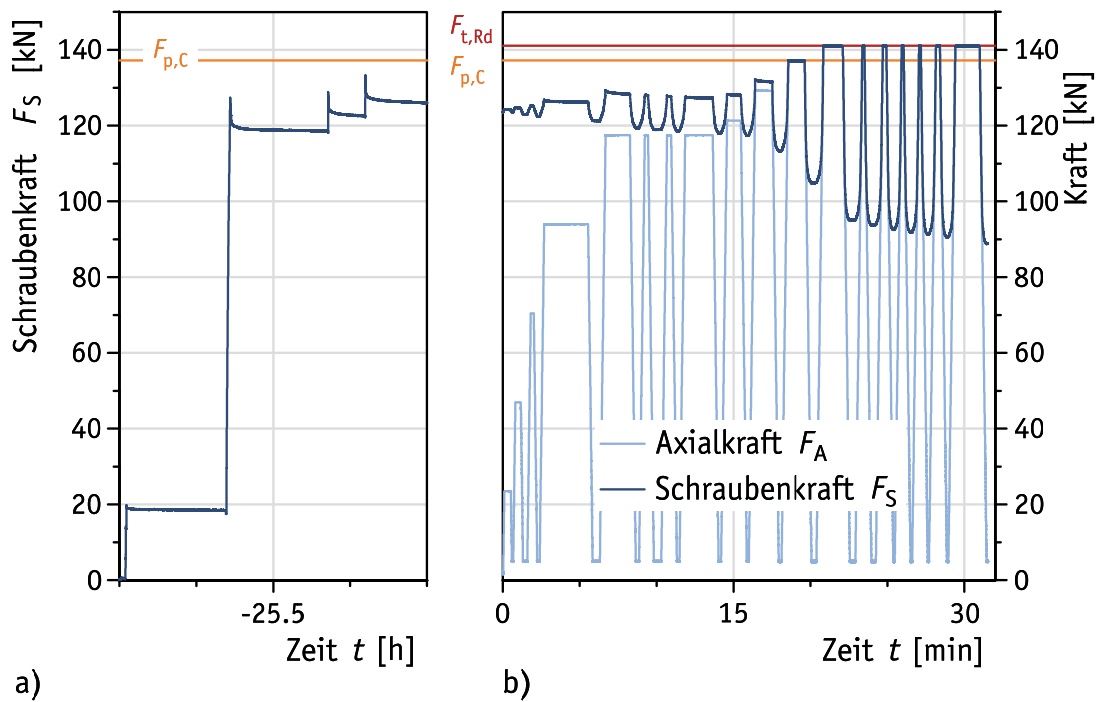
M20 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 27 – Z52						
$F_S$	[kN]		129	132	136	140
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,66	0,67	0,69	0,72
$F_S / F_{p,C}$	[-]		0,94	0,96	0,99	1,02
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,32	0,3	0,25	0,2
		2	0,5	0,45	0,4	0,35
		3	0,45	0,4	0,35	0,35
		4	0,2	0,15	0,125	0,1
		5	0,2	0,15	0,06	0
Fühllehre	[mm]	0,25				
$n_{refusal}$	[-]		2	2	2	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,35	0,31	0,25	0,22
$R / 2$	[mm]		±0,18	±0,18	±0,2	±0,2

**Tabelle C.90.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z52 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.90.** Test results: component tensile test No. Z52 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Belastung (Ursache)										Entlastung (Wirkung)						
Lastwechsel Nr.	Laststufe Nr.	Zeit <i>t</i> [min]	<i>F</i> <sub>A</sub> = <i>F</i> <sub>A,max</sub> [kN]	<i>F</i> <sub>S</sub> = <i>F</i> <sub>S,max</sub> [kN]	<i>F</i> <sub>S</sub> / <i>F</i> <sub>A</sub> [–]	⊥ Klaffen	<i>F</i> <sub>A</sub> / <i>F</i> <sub>L,Rd</sub> [–]	<i>F</i> <sub>S</sub> / <i>F</i> <sub>L,Rd</sub> [–]	<i>F</i> <sub>S</sub> / <i>F</i> <sub>p,C</sub> [–]	Laststufe Nr.	Zeit <i>t</i> [min]	<i>F</i> <sub>A</sub> = <i>F</i> <sub>A,min</sub> [kN]	<i>F</i> <sub>S</sub> = <i>F</i> <sub>S,min</sub> [kN]	<i>F</i> <sub>S</sub> / <i>F</i> <sub>L,Rd</sub> [–]	<i>F</i> <sub>S</sub> / <i>F</i> <sub>p,C</sub> [–]	
M20 × 110 – 86 – Shr002 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 27 – Z52																
M	M			140,1				0,00	0,99	1,02	M			140,1	0,99	1,02
0	0		0,0	129,7				0,00	0,92	0,95	1	-0,3	0,0	129,7	0,92	0,95
1	2	0,1	23,5	130,6	5,56			0,17	0,93	0,95	3	4,6	0,0	129,5	0,92	0,94
2	4	5,5	23,5	130,4	5,55			0,17	0,92	0,95	5	5,8	4,9	129,7	0,92	0,95
3	6	6,0	47,0	131,1	2,79			0,33	0,93	0,96	7	6,4	4,9	129,4	0,92	0,94
4	8	6,8	70,5	131,7	1,87			0,50	0,93	0,96	9	7,5	4,9	128,6	0,91	0,94
5	10	7,9	94,0	132,5	1,41			0,67	0,94	0,97	11	41,2	4,9	126,8	0,90	0,92
6	12	41,7	117,4	134,6	1,15			0,83	0,95	0,98	13	56,8	4,9	124,3	0,88	0,91
7	14	57,7	117,4	132,9	1,13			0,83	0,94	0,97	15	58,4	4,9	123,8	0,88	0,90
8	16	58,8	117,5	132,6	1,13			0,83	0,94	0,97	17	59,5	4,9	123,4	0,87	0,90
9	18	60,1	117,4	132,3	1,13			0,83	0,94	0,96	19	62,6	4,9	123,0	0,87	0,90
10	20	63,1	121,3	133,3	1,10			0,86	0,94	0,97	21	65,1	4,9	122,3	0,87	0,89
11	22	66,1	129,2	136,3	1,05			0,92	0,97	0,99	23	68,1	4,9	119,4	0,85	0,87
12	24	68,6	137,0	140,1	1,02			0,97	0,99	1,02	25	71,8	4,9	111,9	0,79	0,82
13	26	72,4	140,9	141,1	1,00	=	1,00	1,00	1,00	1,03	27	75,2	4,9	106,4	0,75	0,78
14	28	75,7	140,9	140,4	1,00	=	1,00	1,00	1,00	1,02	29	76,5	4,9	105,6	0,75	0,77
15	30	77,0	140,9	140,5	1,00	=	1,00	1,00	1,00	1,02	31	77,8	4,9	104,9	0,74	0,76
16	32	78,3	140,9	140,5	1,00	=	1,00	1,00	1,00	1,02	33	79,1	4,9	104,3	0,74	0,76
17	34	79,6	140,9	140,5	1,00	=	1,00	1,00	1,00	1,02	35	80,5	4,9	103,8	0,74	0,76
18	36	81,0	140,9	140,5	1,00	=	1,00	1,00	1,00	1,02	37	81,7	4,8	103,5	0,73	0,75
19	38	82,2	140,9	140,6	1,00	=	1,00	1,00	1,00	1,02	39	84,3	4,9	102,4	0,73	0,75

**M20 × 110 – 86 – Shr002 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 28 – Z53**




Shr.HV | Shb.H | 75 | DTI.H8 | Shb.HN | Mu.HV.rot


**Bild C.55.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z53 (mit DTI)

**Figure C.55.** Test results: component tensile test No. Z53 (including DTI)



**Tabelle C.91.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z53 (mit DTI) – Anziehen**Table C.91.** Test results: component tensile test No. Z53 (including DTI) – tightening

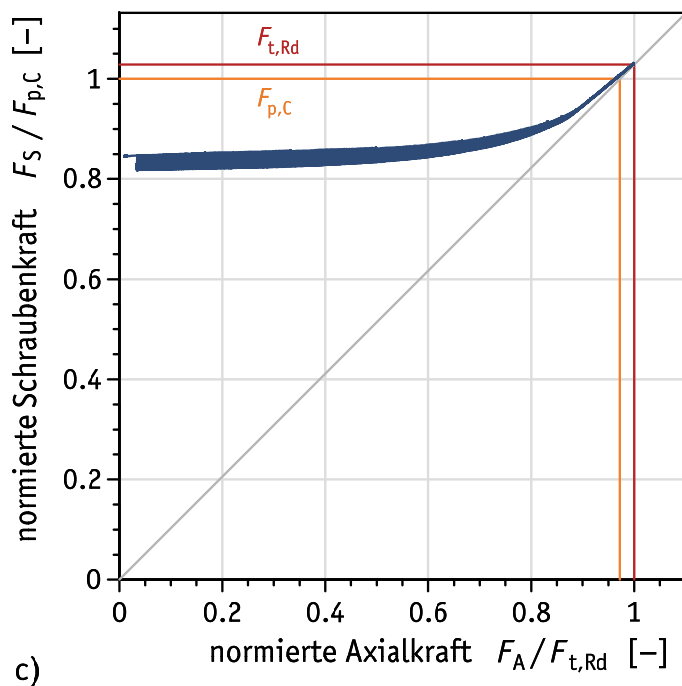
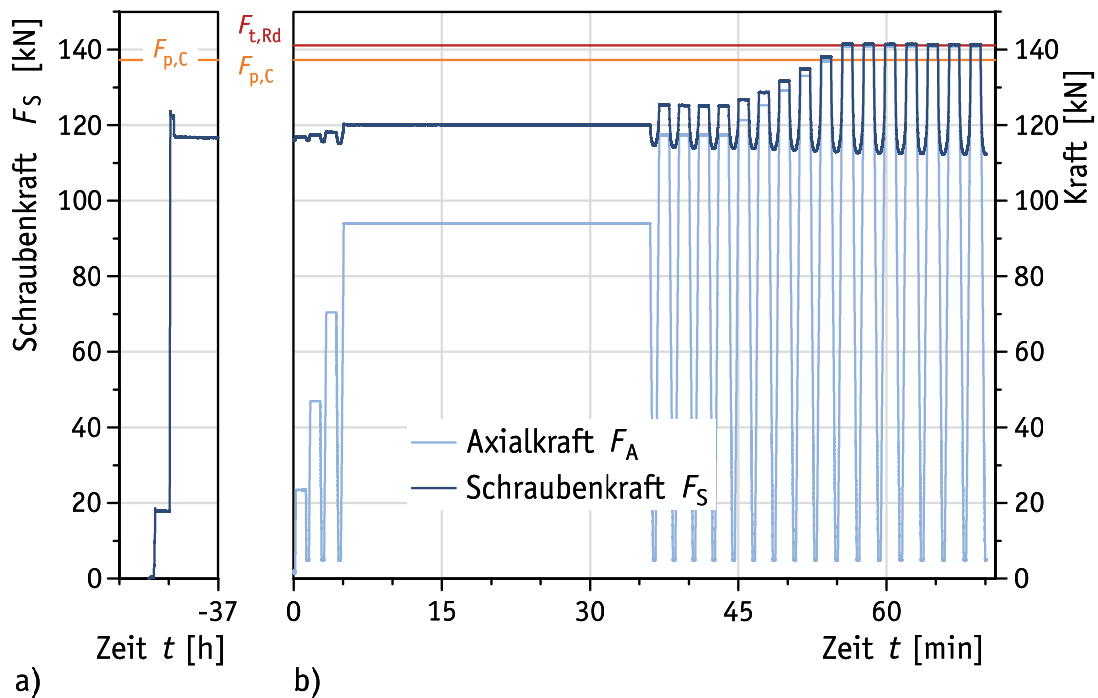
M20 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 28 – Z53					
$F_S$	[kN]		127	129	133
$F_S / F_{ub}$	[-]		0,65	0,66	0,68
$F_S / F_{p,C}$	[-]		0,93	0,94	0,97
$h_{gap,inf}$	[mm]	1	0,125	0,08	0
		2	0,28	0,25	0,2
		3	0,5	0,45	0,4
		4	0,4	0,35	0,32
		5	0,09	0,05	0
Fühllehre	[mm]	0,25			
$n_{refusal}$	[-]		2	2	3
$h_{gap,m}$	[mm]	P2	0,29	0,25	0,2
$R / 2$	[mm]		±0,23	±0,23	±0,23

**Tabelle C.92.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z53 (mit DTI) – Zugversuch**Table C.92.** Test results: component tensile test No. Z53 (including DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
M20 × 110 – 86 – Shr002 – H8 – AND-A2 – Mu.rot – 28 – Z53															
M	M			133,3			0,00	0,94	0,97	M			133,3	0,94	0,97
0	0		0,1	123,4			0,00	0,87	0,90	1	-0,2	0,1	123,4	0,87	0,90
1	2	0,1	23,5	124,3	5,29		0,17	0,88	0,91	3	0,6	4,9	123,5	0,88	0,90
2	4	0,8	47,0	124,8	2,66		0,33	0,88	0,91	5	1,5	4,9	123,0	0,87	0,90
3	6	1,8	70,5	125,3	1,78		0,50	0,89	0,91	7	2,3	4,9	122,4	0,87	0,89
4	8	2,7	94,0	126,7	1,35		0,67	0,90	0,92	9	6,1	4,9	121,3	0,86	0,88
5	10	6,7	117,4	129,3	1,10		0,83	0,92	0,94	11	8,8	4,9	119,4	0,85	0,87
6	12	9,2	117,4	128,1	1,09		0,83	0,91	0,93	13	10,1	4,9	118,9	0,84	0,87
7	14	10,7	117,4	127,9	1,09		0,83	0,91	0,93	15	11,4	4,9	118,5	0,84	0,86
8	16	11,9	117,5	127,5	1,09		0,83	0,90	0,93	17	14,1	4,9	118,0	0,84	0,86
9	18	14,6	121,4	128,3	1,06		0,86	0,91	0,94	19	15,9	4,9	117,4	0,83	0,86
10	20	16,4	129,2	132,2	1,02		0,92	0,94	0,96	21	18,0	4,9	113,2	0,80	0,83
11	22	18,6	137,0	137,3	1,00	=	0,97	0,97	1,00	23	20,2	4,9	104,8	0,74	0,76
12	24	20,8	140,9	141,1	1,00	=	1,00	1,00	1,03	25	22,7	4,9	95,1	0,67	0,69
13	26	23,4	140,9	141,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	27	24,1	4,9	93,8	0,66	0,68
14	28	24,7	140,9	141,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	29	25,4	4,8	92,6	0,66	0,67
15	30	25,9	140,9	141,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	31	26,6	4,8	91,9	0,65	0,67
16	32	27,1	140,9	141,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	33	27,7	4,9	91,3	0,65	0,67
17	34	28,2	140,9	141,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	35	28,9	4,8	90,5	0,64	0,66
18	36	29,4	140,9	141,0	1,00	=	1,00	1,00	1,03	37	31,5	4,9	88,9	0,63	0,65

**M20 × 110 – 83 – Shr002 – H8 – Vgl – Z54**

Shr.HV | Shb.H | 75 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.56.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z54 (ohne DTI)

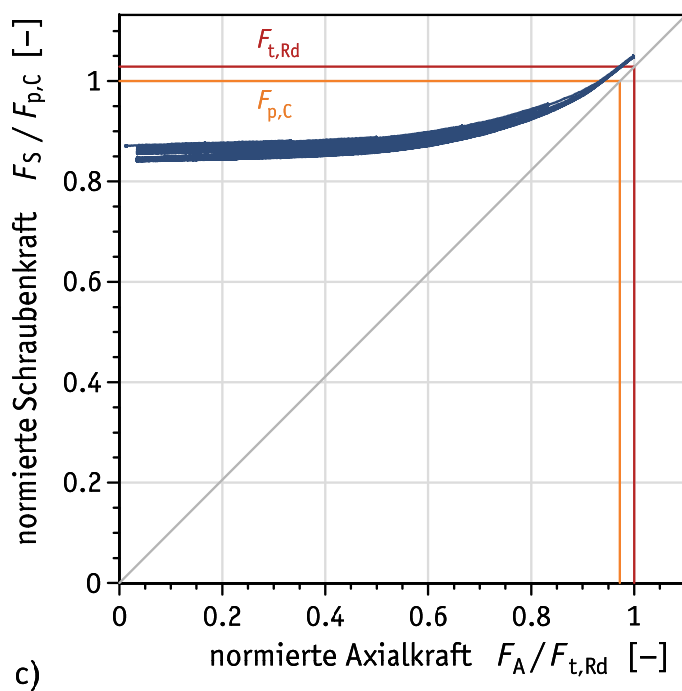
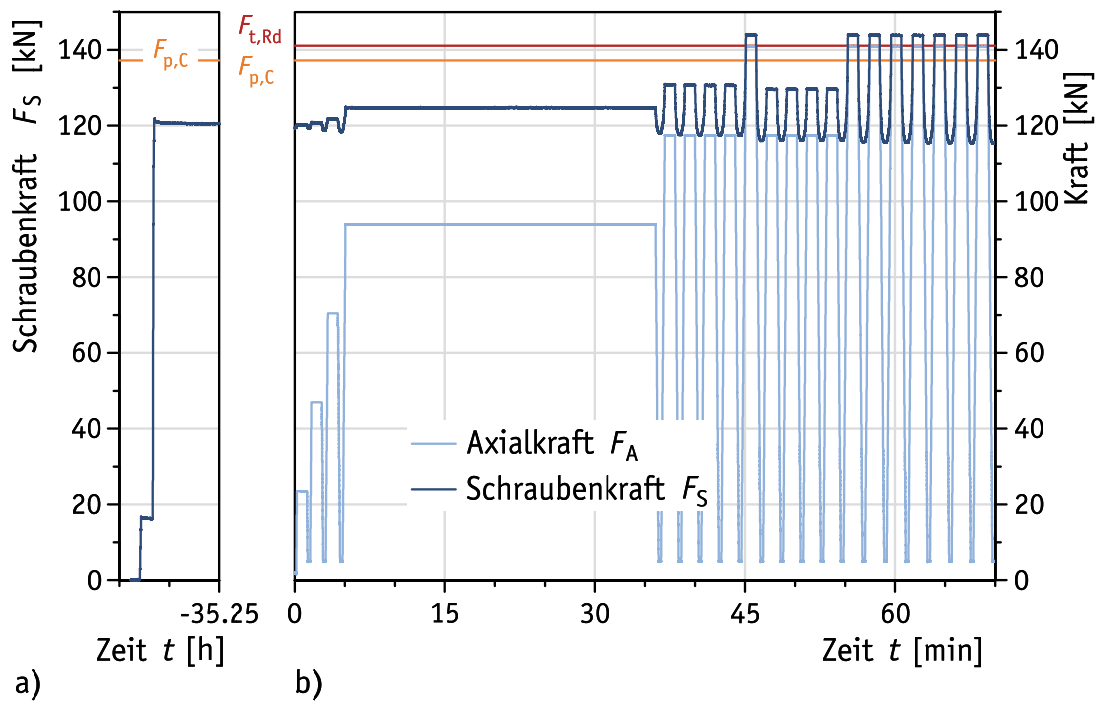
**Figure C.56.** Test results: component tensile test No. Z54 (without DTI)

**Tabelle C.93.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z54 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.93.** Test results: component tensile test No. Z54 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	Klaffen =	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M20 × 110 – 83 – Shr002 – H8 – Vgl – Z54</b>															
M	M			117,6			0,00	0,83	0,86	M			117,6	0,83	0,86
0	0		0,0	116,0			0,00	0,82	0,85	1	-0,3	0,0	116,0	0,82	0,85
1	2	0,2	23,5	116,8	4,97		0,17	0,83	0,85	3	1,4	4,9	116,1	0,82	0,85
2	4	1,7	47,0	117,5	2,50		0,33	0,83	0,86	5	3,0	4,9	115,7	0,82	0,84
3	6	3,3	70,4	118,3	1,68		0,50	0,84	0,86	7	4,7	4,9	115,1	0,82	0,84
4	8	5,1	93,9	120,2	1,28		0,67	0,85	0,88	9	36,5	4,9	114,7	0,81	0,84
5	10	37,0	117,5	125,3	1,07		0,83	0,89	0,91	11	38,5	4,9	114,2	0,81	0,83
6	12	39,0	117,4	125,2	1,07		0,83	0,89	0,91	13	40,5	4,9	114,1	0,81	0,83
7	14	41,0	117,4	125,1	1,06		0,83	0,89	0,91	15	42,5	4,9	113,9	0,81	0,83
8	16	43,0	117,4	125,1	1,07		0,83	0,89	0,91	17	44,5	4,9	113,9	0,81	0,83
9	18	45,1	121,4	126,7	1,04		0,86	0,90	0,92	19	46,5	4,9	113,8	0,81	0,83
10	20	47,1	125,3	128,6	1,03		0,89	0,91	0,94	21	48,6	4,9	113,7	0,81	0,83
11	22	49,2	129,2	131,7	1,02		0,92	0,93	0,96	23	50,7	4,9	113,4	0,80	0,83
12	24	51,3	133,1	134,9	1,01		0,94	0,96	0,98	25	52,8	4,9	113,2	0,80	0,83
13	26	53,4	137,0	138,1	1,01		0,97	0,98	1,01	27	55,0	4,9	113,0	0,80	0,82
14	28	55,5	140,9	141,4	1,00	=	1,00	1,00	1,03	29	57,1	4,9	112,7	0,80	0,82
15	30	57,7	140,9	141,3	1,00	=	1,00	1,00	1,03	31	59,3	4,9	112,7	0,80	0,82
16	32	59,9	140,9	141,3	1,00	=	1,00	1,00	1,03	33	61,5	4,9	112,6	0,80	0,82
17	34	62,0	140,9	141,4	1,00	=	1,00	1,00	1,03	35	63,6	4,9	112,5	0,80	0,82
18	36	64,2	140,9	141,2	1,00	=	1,00	1,00	1,03	37	65,8	4,9	112,3	0,80	0,82
19	38	66,4	140,9	141,2	1,00	=	1,00	1,00	1,03	39	67,9	4,9	112,4	0,80	0,82
20	40	68,5	140,9	141,3	1,00	=	1,00	1,00	1,03	41	70,1	4,9	112,3	0,80	0,82

**M20 × 110 – 83 – Shr005 – H8 – Vgl – Z55**

Shr.HV | Shb.H | 75 | Shb.H | Mu.HV.rot

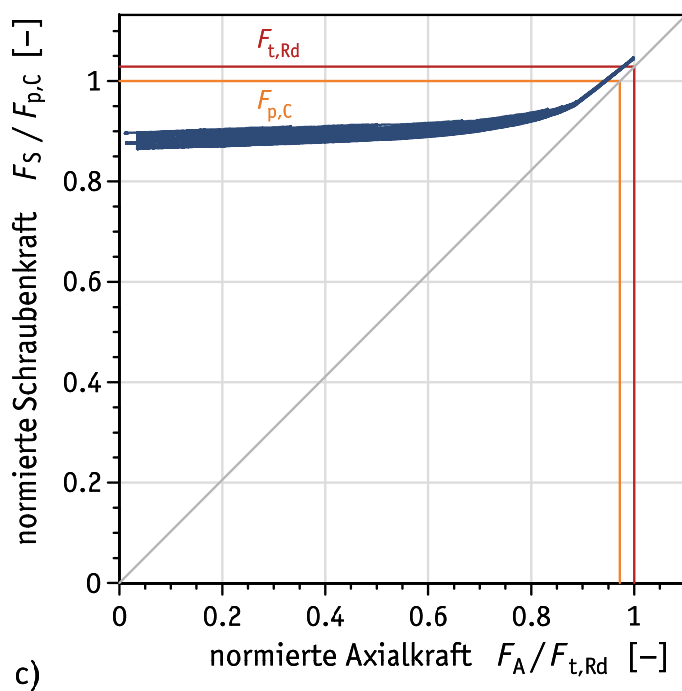
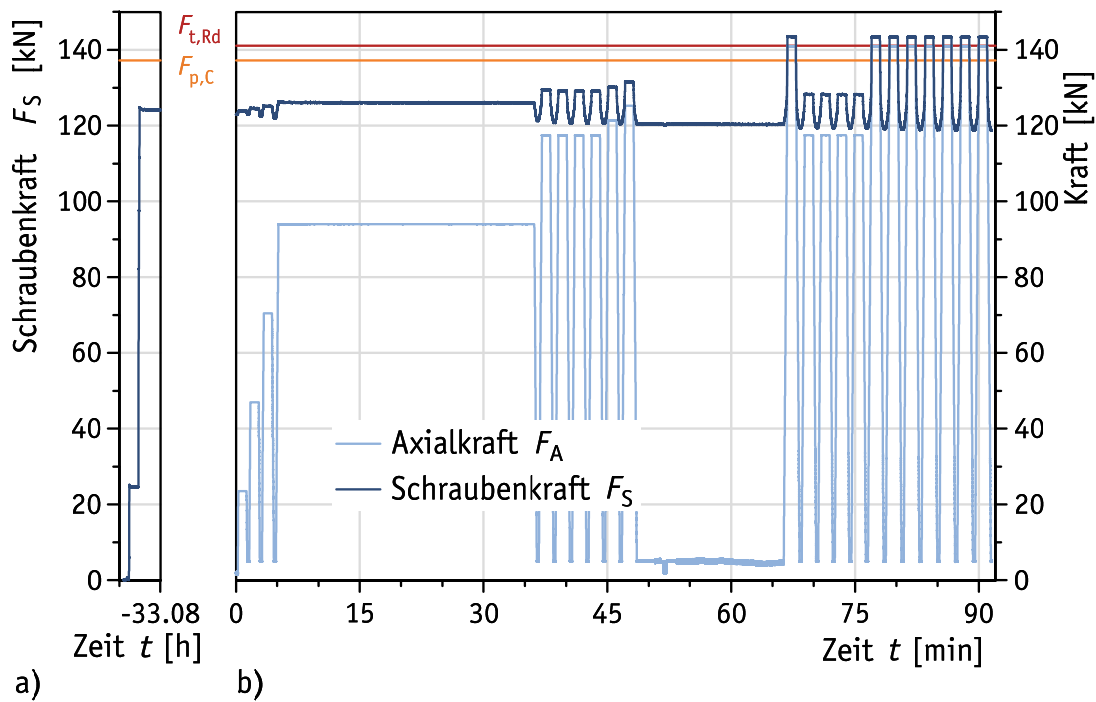
**Bild C.57.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z55 (ohne DTI)**Figure C.57.** Test results: component tensile test No. Z55 (without DTI)

**Tabelle C.94.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z55 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.94.** Test results: component tensile test No. Z55 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	Klaffen =	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M20 × 110 – 83 – Shr005 – H8 – Vgl – Z55</b>															
M	M			121,8			0,00	0,86	0,89	M			121,8	0,86	0,89
0	0		0,1	119,4			0,00	0,85	0,87	1	-0,2	0,1	119,4	0,85	0,87
1	2	0,2	23,5	120,3	5,12		0,17	0,85	0,88	3	1,4	4,9	119,3	0,85	0,87
2	4	1,7	46,9	120,9	2,57		0,33	0,86	0,88	5	3,0	4,9	118,8	0,84	0,87
3	6	3,3	70,4	121,9	1,73		0,50	0,86	0,89	7	4,6	4,9	118,4	0,84	0,86
4	8	5,1	93,9	124,8	1,33		0,67	0,88	0,91	9	36,5	4,9	118,0	0,84	0,86
5	10	37,0	117,4	131,0	1,12		0,83	0,93	0,95	11	38,5	4,9	117,7	0,83	0,86
6	12	39,0	117,4	130,7	1,11		0,83	0,93	0,95	13	40,5	4,9	117,4	0,83	0,86
7	14	41,0	117,4	130,7	1,11		0,83	0,93	0,95	15	42,5	4,9	117,5	0,83	0,86
8	16	43,0	117,4	130,7	1,11		0,83	0,93	0,95	17	44,5	4,9	117,4	0,83	0,86
9	18	45,1	140,9	144,0	1,02		1,00	1,02	1,05	19	46,7	4,9	116,0	0,82	0,85
10	20	47,2	117,4	129,7	1,10		0,83	0,92	0,95	21	48,7	4,9	116,2	0,82	0,85
11	22	49,2	117,4	129,6	1,10		0,83	0,92	0,94	23	50,7	4,9	116,1	0,82	0,85
12	24	51,2	117,4	129,7	1,10		0,83	0,92	0,95	25	52,7	4,9	116,2	0,82	0,85
13	26	53,2	117,4	129,8	1,11		0,83	0,92	0,95	27	54,7	4,9	116,0	0,82	0,85
14	28	55,3	140,9	143,9	1,02		1,00	1,02	1,05	29	56,9	4,9	115,7	0,82	0,84
15	30	57,5	140,9	143,8	1,02		1,00	1,02	1,05	31	59,0	4,9	115,6	0,82	0,84
16	32	59,6	140,9	143,9	1,02		1,00	1,02	1,05	33	61,2	4,9	115,6	0,82	0,84
17	34	61,8	140,9	143,8	1,02		1,00	1,02	1,05	35	63,4	4,9	115,4	0,82	0,84
18	36	64,0	140,9	143,8	1,02		1,00	1,02	1,05	37	65,5	4,9	115,5	0,82	0,84
19	38	66,1	140,9	143,7	1,02		1,00	1,02	1,05	39	67,7	4,9	115,4	0,82	0,84
20	40	68,3	140,9	143,9	1,02		1,00	1,02	1,05	41	69,9	4,9	115,4	0,82	0,84

**M20 × 110 – 83 – Shr001 – H8 – Vgl – Z56**

Shr.HV | Shb.H | 75 | Shb.H | Mu.HV.rot


**Bild C.58.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z56 (ohne DTI)

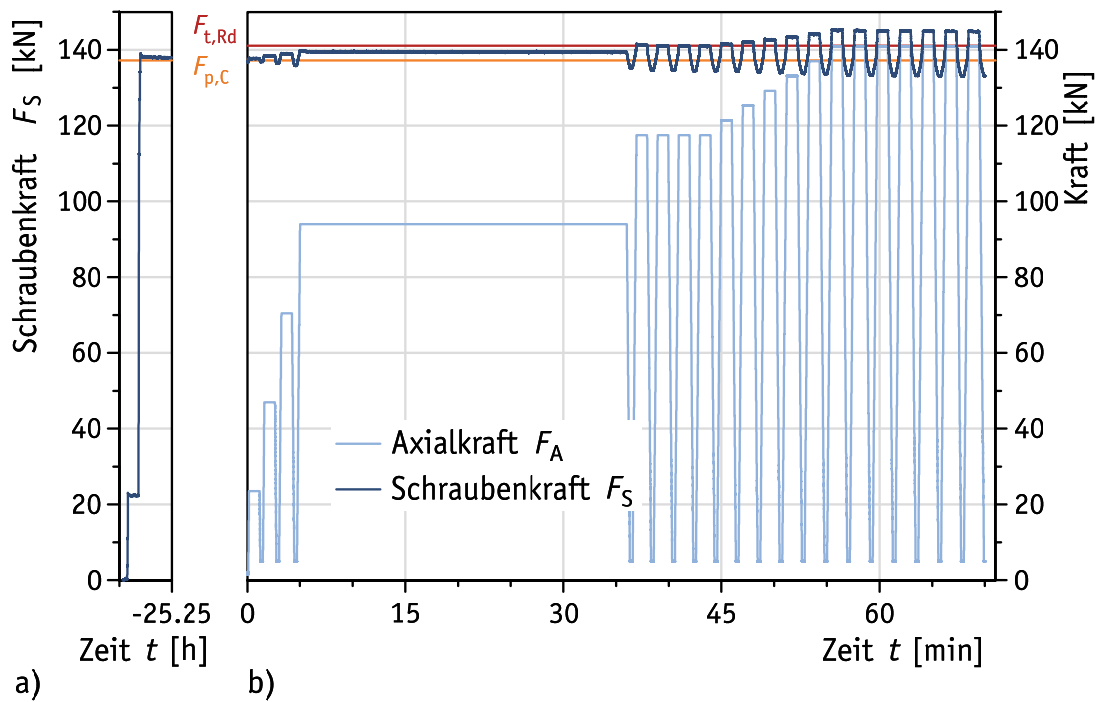
**Figure C.58.** Test results: component tensile test No. Z56 (without DTI)

**Tabelle C.95.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z56 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.95.** Test results: component tensile test No. Z56 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	Klaffen =	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M20 × 110 – 83 – Shr001 – H8 – Vgl – Z56</b>															
M	M			124,8			0,00	0,88	0,91	M			124,8	0,88	0,91
0	0		0,0	122,9			0,00	0,87	0,90	1	-0,4	0,0	122,9	0,87	0,90
1	2	0,3	23,5	123,9	5,27		0,17	0,88	0,90	3	1,5	4,9	123,0	0,87	0,90
2	4	1,8	47,0	124,7	2,66		0,33	0,88	0,91	5	3,0	4,9	122,5	0,87	0,89
3	6	3,4	70,4	125,3	1,78		0,50	0,89	0,91	7	4,7	4,9	121,9	0,86	0,89
4	8	5,1	94,0	126,4	1,35		0,67	0,90	0,92	9	36,6	4,9	121,3	0,86	0,88
5	10	37,1	117,4	129,6	1,10		0,83	0,92	0,94	11	38,6	4,9	120,9	0,86	0,88
6	12	39,1	117,5	129,3	1,10		0,83	0,92	0,94	13	40,6	5,0	120,6	0,85	0,88
7	14	41,1	117,5	129,2	1,10		0,83	0,92	0,94	15	42,6	4,9	120,7	0,86	0,88
8	16	43,1	117,4	129,0	1,10		0,83	0,91	0,94	17	44,6	4,9	120,6	0,85	0,88
9	18	45,1	121,4	130,1	1,07		0,86	0,92	0,95	19	46,6	4,9	120,5	0,85	0,88
10	20	47,2	125,3	131,5	1,05		0,89	0,93	0,96	21	49,1	4,9	120,3	0,85	0,88
11	22	66,8	140,9	143,5	1,02		1,00	1,02	1,05	23	68,4	4,9	119,4	0,85	0,87
12	24	68,9	117,5	128,3	1,09		0,83	0,91	0,94	25	70,4	4,9	119,4	0,85	0,87
13	26	70,9	117,4	128,3	1,09		0,83	0,91	0,94	27	72,4	4,9	119,5	0,85	0,87
14	28	72,9	117,4	128,2	1,09		0,83	0,91	0,93	29	74,4	4,9	119,4	0,85	0,87
15	30	74,9	117,5	128,2	1,09		0,83	0,91	0,93	31	76,4	4,9	119,4	0,85	0,87
16	32	77,0	140,9	143,3	1,02		1,00	1,02	1,04	33	78,6	4,9	119,2	0,84	0,87
17	34	79,2	140,9	143,4	1,02		1,00	1,02	1,04	35	80,8	4,9	119,0	0,84	0,87
18	36	81,3	140,9	143,4	1,02		1,00	1,02	1,05	37	82,9	4,9	119,0	0,84	0,87
19	38	83,5	140,9	143,4	1,02		1,00	1,02	1,05	39	85,1	4,9	119,0	0,84	0,87
20	40	85,7	140,9	143,4	1,02		1,00	1,02	1,04	41	87,3	4,9	118,8	0,84	0,87
21	42	87,8	140,9	143,4	1,02		1,00	1,02	1,05	43	89,4	4,9	118,8	0,84	0,87
22	44	90,0	140,9	143,3	1,02		1,00	1,02	1,04	45	91,6	4,9	118,7	0,84	0,87

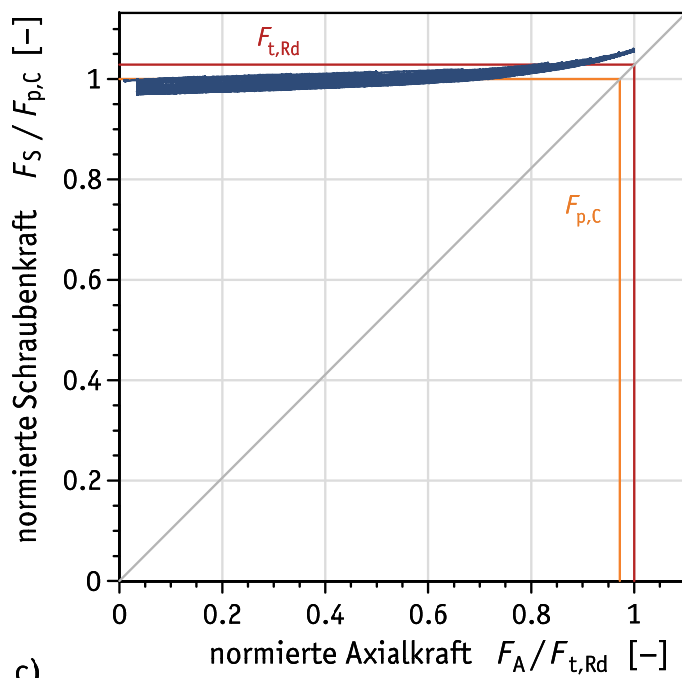
**M20 × 110 – 83 – Shr001 – H8 – Vgl – Z57**

Shr.HV | Shb.H | 75 | Shb.H | Mu.HV.rot



a)

b)



c)

**Bild C.59.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z57 (ohne DTI)**Figure C.59.** Test results: component tensile test No. Z57 (without DTI)

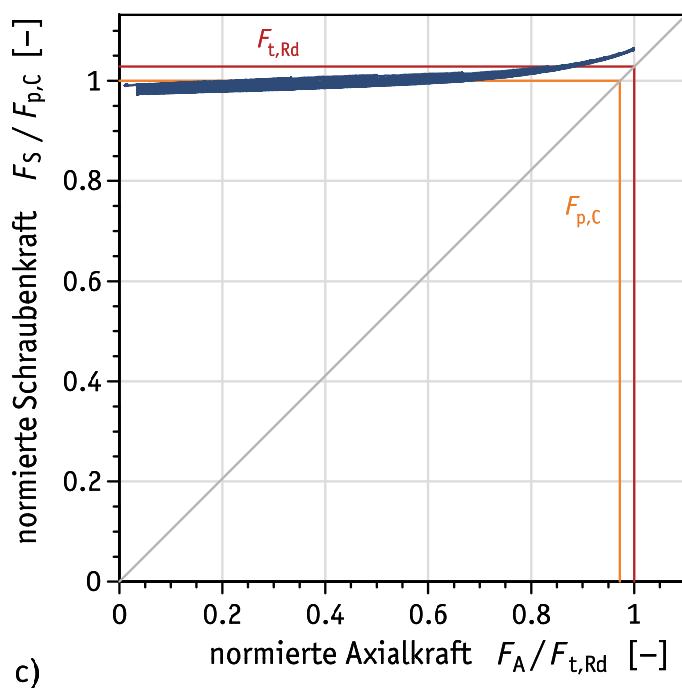
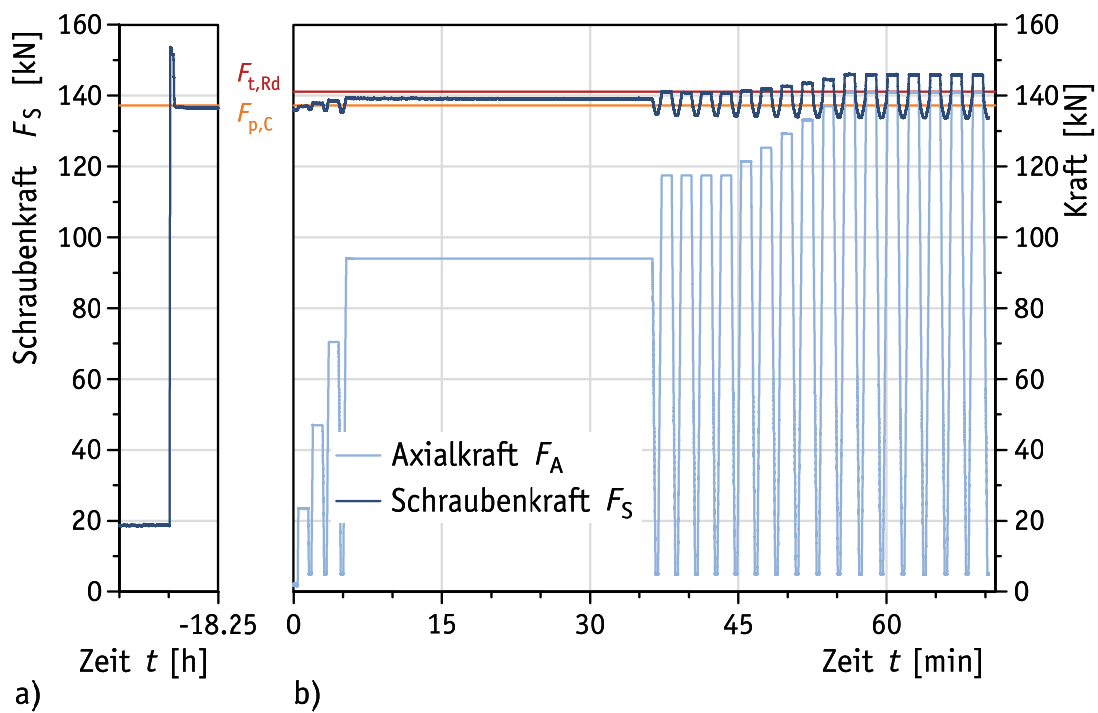


**Tabelle C.96.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z57 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.96.** Test results: component tensile test No. Z57 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	Klaffen =	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M20 × 110 – 83 – Shr001 – H8 – Vgl – Z57</b>															
M	M			139,0			0,00	0,98	1,01	M			139,0	0,98	1,01
0	0		0,0	136,8			0,00	0,97	1,00	1	-0,3	0,0	136,8	0,97	1,00
1	2	0,2	23,5	137,8	5,87		0,17	0,98	1,00	3	1,4	4,9	136,8	0,97	1,00
2	4	1,6	47,0	138,5	2,95		0,33	0,98	1,01	5	2,9	4,9	136,6	0,97	1,00
3	6	3,2	70,5	139,0	1,97		0,50	0,99	1,01	7	4,6	4,9	135,8	0,96	0,99
4	8	5,0	94,0	139,8	1,49		0,67	0,99	1,02	9	36,4	4,9	135,3	0,96	0,99
5	10	36,9	117,5	141,6	1,21		0,83	1,00	1,03	11	38,5	4,9	134,7	0,95	0,98
6	12	39,0	117,4	141,1	1,20		0,83	1,00	1,03	13	40,4	4,9	134,6	0,95	0,98
7	14	41,0	117,5	141,0	1,20		0,83	1,00	1,03	15	42,5	4,9	134,5	0,95	0,98
8	16	43,0	117,5	141,0	1,20		0,83	1,00	1,03	17	44,5	4,9	134,5	0,95	0,98
9	18	45,0	121,4	141,6	1,17		0,86	1,00	1,03	19	46,5	4,9	134,3	0,95	0,98
10	20	47,0	125,3	142,0	1,13		0,89	1,01	1,04	21	48,6	4,9	134,0	0,95	0,98
11	22	49,1	129,2	142,8	1,11		0,92	1,01	1,04	23	50,6	4,9	134,1	0,95	0,98
12	24	51,2	133,1	143,4	1,08		0,94	1,02	1,04	25	52,8	4,9	133,8	0,95	0,98
13	26	53,3	137,0	144,3	1,05		0,97	1,02	1,05	27	54,9	4,9	133,6	0,95	0,97
14	28	55,5	140,9	145,3	1,03		1,00	1,03	1,06	29	57,0	4,9	133,5	0,95	0,97
15	30	57,6	140,9	145,1	1,03		1,00	1,03	1,06	31	59,2	4,9	133,2	0,94	0,97
16	32	59,8	140,9	145,0	1,03		1,00	1,03	1,06	33	61,4	4,9	133,3	0,94	0,97
17	34	62,0	140,9	144,9	1,03		1,00	1,03	1,06	35	63,5	4,9	133,2	0,94	0,97
18	36	64,1	140,9	144,9	1,03		1,00	1,03	1,06	37	65,7	4,9	133,0	0,94	0,97
19	38	66,3	140,9	145,0	1,03		1,00	1,03	1,06	39	67,9	4,9	133,0	0,94	0,97
20	40	68,5	140,9	144,8	1,03		1,00	1,03	1,06	41	70,0	4,9	133,1	0,94	0,97

**M20 × 110 – 83 – Shr002 – H8 – Vgl – Z58**

Shr.HV | Shb.H | 75 | Shb.H | Mu.HV.rot

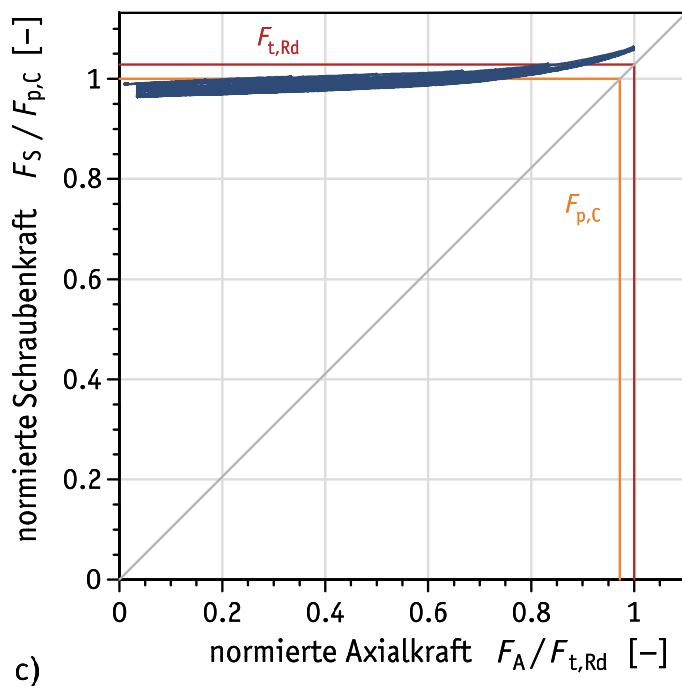
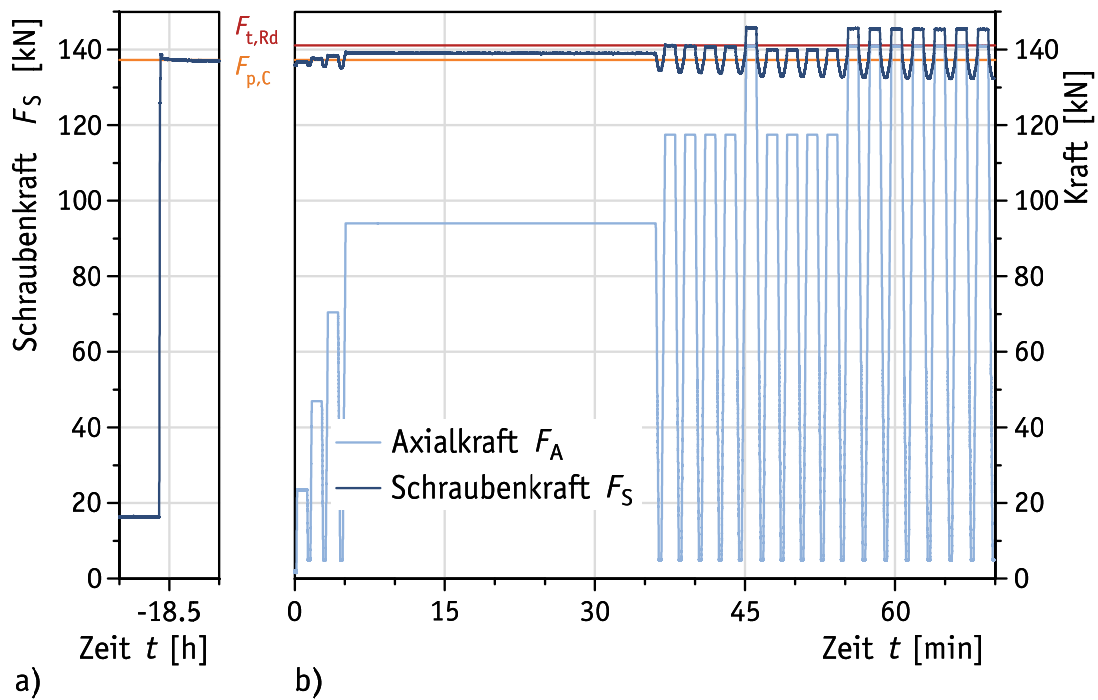
**Bild C.60.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z58 (ohne DTI)**Figure C.60.** Test results: component tensile test No. Z58 (without DTI)

**Tabelle C.97.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z58 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.97.** Test results: component tensile test No. Z58 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	Klaffen =	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M20 × 110 – 83 – Shr002 – H8 – Vgl – Z58</b>															
M	M			137,0			0,00	0,97	1,00	M			137,0	0,97	1,00
0	0		0,0	136,1			0,00	0,96	0,99	1	-0,5	0,0	136,1	0,96	0,99
1	2	0,5	23,4	136,9	5,85		0,17	0,97	1,00	3	1,7	4,9	136,0	0,96	0,99
2	4	1,9	46,9	138,0	2,94		0,33	0,98	1,01	5	3,2	4,9	135,9	0,96	0,99
3	6	3,6	70,5	138,7	1,97		0,50	0,98	1,01	7	4,9	4,9	135,5	0,96	0,99
4	8	5,3	94,0	139,4	1,48		0,67	0,99	1,02	9	36,8	4,9	134,8	0,96	0,98
5	10	37,3	117,5	141,1	1,20		0,83	1,00	1,03	11	38,8	4,9	134,5	0,95	0,98
6	12	39,3	117,5	140,8	1,20		0,83	1,00	1,03	13	40,8	4,9	134,3	0,95	0,98
7	14	41,3	117,5	140,9	1,20		0,83	1,00	1,03	15	42,8	4,9	134,4	0,95	0,98
8	16	43,3	117,5	140,8	1,20		0,83	1,00	1,03	17	44,8	4,9	134,3	0,95	0,98
9	18	45,3	121,4	141,4	1,16		0,86	1,00	1,03	19	46,8	4,9	134,1	0,95	0,98
10	20	47,3	125,3	141,9	1,13		0,89	1,01	1,03	21	48,9	4,9	134,2	0,95	0,98
11	22	49,4	129,2	142,6	1,10		0,92	1,01	1,04	23	50,9	4,9	134,0	0,95	0,98
12	24	51,5	133,1	143,5	1,08		0,94	1,02	1,05	25	53,1	4,9	134,0	0,95	0,98
13	26	53,6	137,0	144,7	1,06		0,97	1,03	1,05	27	55,2	4,9	134,1	0,95	0,98
14	28	55,8	140,9	145,9	1,04		1,00	1,03	1,06	29	57,4	4,9	133,8	0,95	0,98
15	30	58,0	140,9	145,8	1,04		1,00	1,03	1,06	31	59,5	4,9	133,8	0,95	0,98
16	32	60,1	140,9	145,9	1,04		1,00	1,03	1,06	33	61,7	4,9	133,8	0,95	0,98
17	34	62,3	140,9	145,8	1,03		1,00	1,03	1,06	35	63,9	4,9	133,7	0,95	0,97
18	36	64,4	140,9	145,8	1,04		1,00	1,03	1,06	37	66,0	4,9	133,7	0,95	0,97
19	38	66,6	140,9	145,8	1,03		1,00	1,03	1,06	39	68,2	4,9	133,6	0,95	0,97
20	40	68,8	140,9	145,9	1,04		1,00	1,03	1,06	41	70,3	4,9	133,7	0,95	0,97

**M20 × 110 – 83 – Shr005 – H8 – Vgl – Z59**

Shr.HV | Shb.H | 75 | Shb.H | Mu.HV.rot

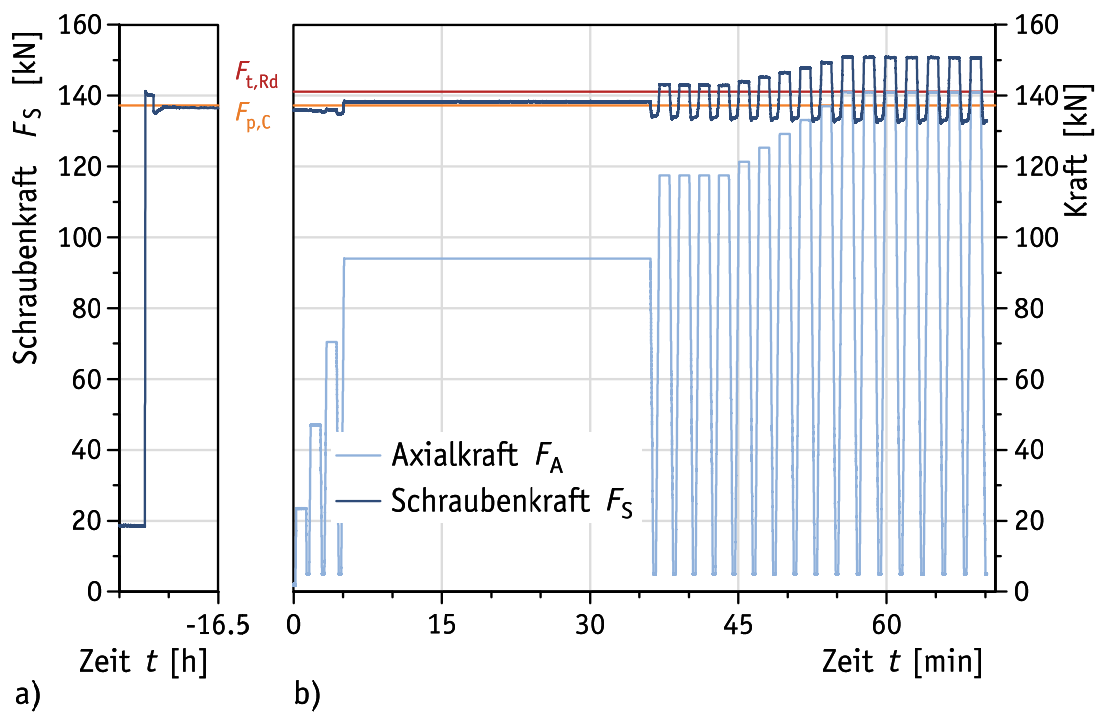
**Bild C.61.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z59 (ohne DTI)**Figure C.61.** Test results: component tensile test No. Z59 (without DTI)

**Tabelle C.98.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z59 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.98.** Test results: component tensile test No. Z59 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	Klaffen =	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M20 × 110 – 83 – Shr005 – H8 – Vgl – Z59</b>															
M	M			138,7			0,00	0,98	1,01	M			138,7	0,98	1,01
0	0		0,1	135,7			0,00	0,96	0,99	1	-0,2	0,1	135,7	0,96	0,99
1	2	0,3	23,6	136,8	5,80		0,17	0,97	1,00	3	1,4	4,9	135,9	0,96	0,99
2	4	1,8	47,0	137,7	2,93		0,33	0,98	1,00	5	3,0	4,9	135,6	0,96	0,99
3	6	3,3	70,5	138,4	1,96		0,50	0,98	1,01	7	4,7	4,9	135,2	0,96	0,99
4	8	5,1	94,0	139,4	1,48		0,67	0,99	1,02	9	36,5	4,9	134,6	0,95	0,98
5	10	37,0	117,5	141,3	1,20		0,83	1,00	1,03	11	38,5	4,9	134,1	0,95	0,98
6	12	39,0	117,5	140,9	1,20		0,83	1,00	1,03	13	40,5	4,9	133,9	0,95	0,98
7	14	41,0	117,5	140,7	1,20		0,83	1,00	1,03	15	42,5	4,9	133,8	0,95	0,98
8	16	43,0	117,5	140,8	1,20		0,83	1,00	1,03	17	44,6	4,9	133,8	0,95	0,97
9	18	45,1	140,9	145,8	1,03		1,00	1,03	1,06	19	46,7	4,9	133,0	0,94	0,97
10	20	47,2	117,5	140,0	1,19		0,83	0,99	1,02	21	48,8	4,9	133,0	0,94	0,97
11	22	49,2	117,5	139,9	1,19		0,83	0,99	1,02	23	50,7	4,9	132,9	0,94	0,97
12	24	51,2	117,5	139,9	1,19		0,83	0,99	1,02	25	52,7	4,9	132,9	0,94	0,97
13	26	53,2	117,5	139,9	1,19		0,83	0,99	1,02	27	54,8	4,9	132,8	0,94	0,97
14	28	55,3	140,9	145,6	1,03		1,00	1,03	1,06	29	56,9	4,9	132,6	0,94	0,97
15	30	57,5	140,9	145,5	1,03		1,00	1,03	1,06	31	59,1	4,9	132,6	0,94	0,97
16	32	59,6	140,9	145,3	1,03		1,00	1,03	1,06	33	61,2	4,9	132,5	0,94	0,97
17	34	61,8	140,9	145,2	1,03		1,00	1,03	1,06	35	63,4	4,9	132,4	0,94	0,97
18	36	64,0	140,9	145,3	1,03		1,00	1,03	1,06	37	65,6	4,9	132,4	0,94	0,96
19	38	66,1	140,9	145,3	1,03		1,00	1,03	1,06	39	67,7	4,9	132,5	0,94	0,97
20	40	68,3	140,9	145,2	1,03		1,00	1,03	1,06	41	69,9	4,9	132,4	0,94	0,97

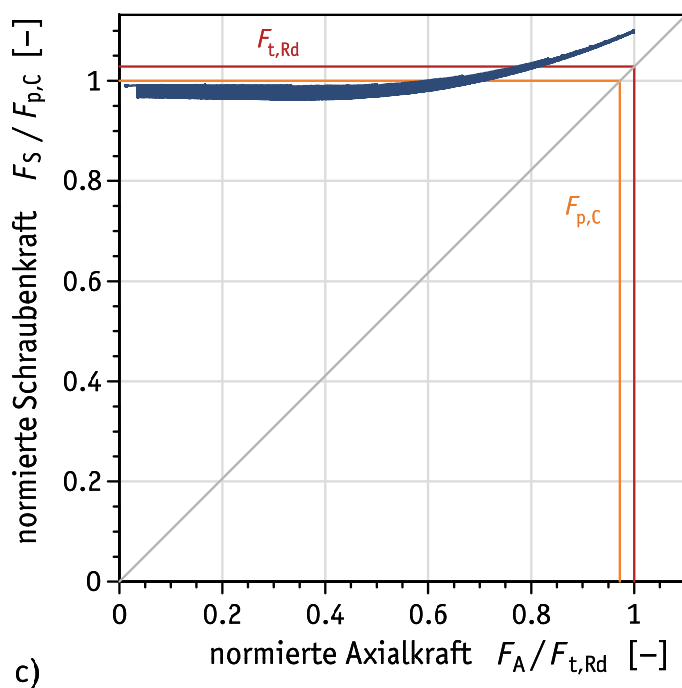
**M20 × 80 – 54 – Shr002 – H8 – Vgl – Z60**

Shr.HV | Shb.H | 46 | Shb.H | Mu.HV.rot



a)

b)



c)

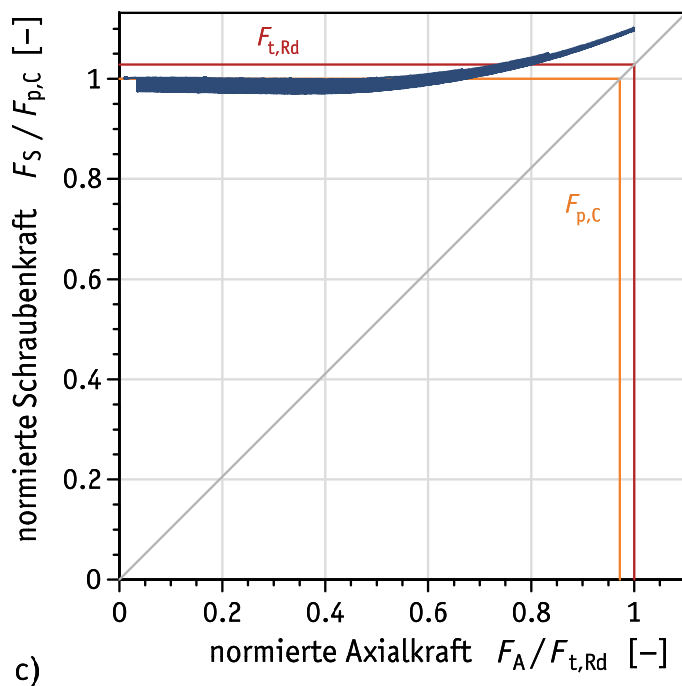
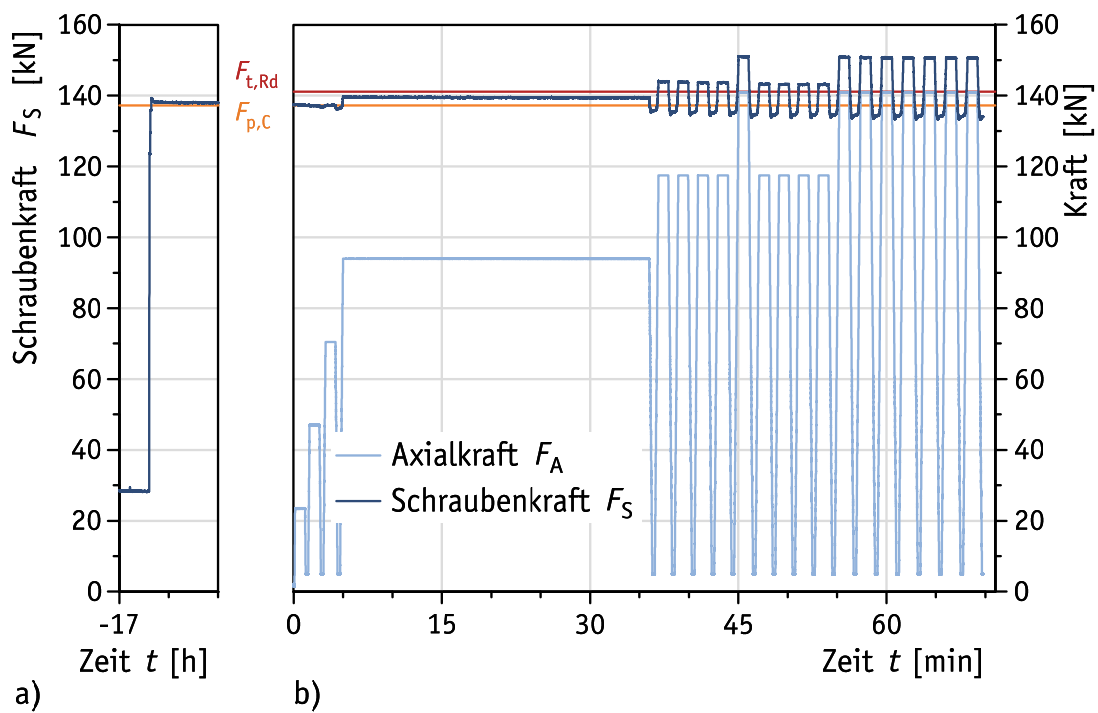
**Bild C.62.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z60 (ohne DTI)**Figure C.62.** Test results: component tensile test No. Z60 (without DTI)

**Tabelle C.99.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z60 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.99.** Test results: component tensile test No. Z60 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	Klaffen =	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M20 × 80 – 54 – Shr002 – H8 – Vgl – Z60</b>															
M	M			137,0			0,00	0,97	1,00	M			137,0	0,97	1,00
0	0		0,1	135,8			0,00	0,96	0,99	1	-0,2	0,1	135,8	0,96	0,99
1	2	0,3	23,4	136,0	5,82		0,17	0,96	0,99	3	1,5	4,9	135,7	0,96	0,99
2	4	1,7	46,8	136,0	2,90		0,33	0,96	0,99	5	3,0	4,9	135,5	0,96	0,99
3	6	3,3	70,5	136,2	1,93		0,50	0,97	0,99	7	4,7	4,9	134,8	0,96	0,98
4	8	5,1	94,0	138,5	1,47		0,67	0,98	1,01	9	36,5	4,9	134,4	0,95	0,98
5	10	37,0	117,5	143,1	1,22		0,83	1,01	1,04	11	38,6	4,9	133,9	0,95	0,98
6	12	39,0	117,5	143,0	1,22		0,83	1,01	1,04	13	40,6	4,9	133,9	0,95	0,98
7	14	41,1	117,5	143,0	1,22		0,83	1,01	1,04	15	42,6	4,9	133,8	0,95	0,98
8	16	43,1	117,5	142,8	1,22		0,83	1,01	1,04	17	44,6	4,9	133,7	0,95	0,97
9	18	45,1	121,4	144,0	1,19		0,86	1,02	1,05	19	46,6	4,9	133,7	0,95	0,97
10	20	47,1	125,3	145,2	1,16		0,89	1,03	1,06	21	48,7	4,9	133,6	0,95	0,97
11	22	49,2	129,2	146,3	1,13		0,92	1,04	1,07	23	50,7	4,9	133,6	0,95	0,97
12	24	51,3	133,1	147,7	1,11		0,94	1,05	1,08	25	52,9	4,9	133,4	0,95	0,97
13	26	53,4	137,0	149,4	1,09		0,97	1,06	1,09	27	55,0	4,9	133,3	0,94	0,97
14	28	55,6	140,9	150,9	1,07		1,00	1,07	1,10	29	57,1	4,9	133,1	0,94	0,97
15	30	57,7	140,9	150,8	1,07		1,00	1,07	1,10	31	59,3	4,9	133,2	0,94	0,97
16	32	59,9	140,9	150,8	1,07		1,00	1,07	1,10	33	61,5	4,9	133,1	0,94	0,97
17	34	62,1	140,9	150,7	1,07		1,00	1,07	1,10	35	63,7	4,9	133,1	0,94	0,97
18	36	64,2	140,9	150,7	1,07		1,00	1,07	1,10	37	65,8	4,9	133,0	0,94	0,97
19	38	66,4	140,9	150,7	1,07		1,00	1,07	1,10	39	68,0	4,9	133,0	0,94	0,97
20	40	68,6	140,9	150,6	1,07		1,00	1,07	1,10	41	70,2	4,9	132,9	0,94	0,97

**M20 × 80 – 54 – Shr002 – H8 – Vgl – Z61**

Shr.HV | Shb.H | 46 | Shb.H | Mu.HV.rot

**Bild C.63.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z61 (ohne DTI)**Figure C.63.** Test results: component tensile test No. Z61 (without DTI)

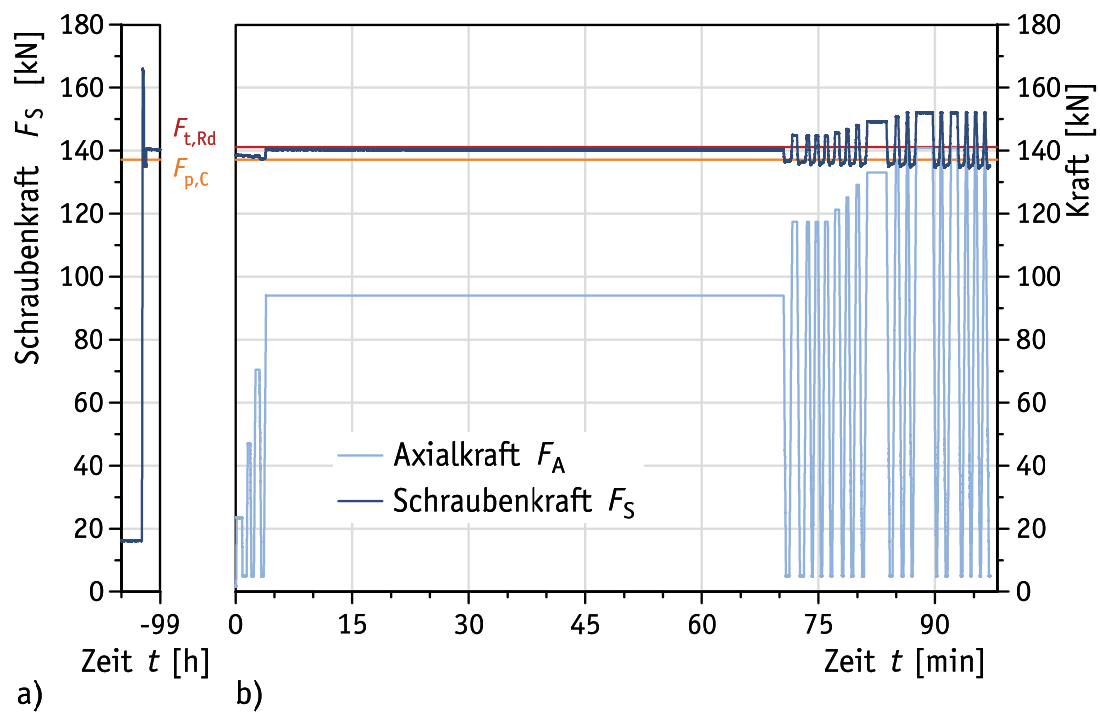


**Tabelle C.100.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z61 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.100.** Test results: component tensile test No. Z61 (without DTI) – tensile test

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	= Klaffen	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M20 × 80 – 54 – Shr002 – H8 – Vgl – Z61</b>															
M	M			139,3			0,00	0,99	1,01	M			139,3	0,99	1,01
0	0		0,0	137,4			0,00	0,97	1,00	1	-0,3	0,0	137,4	0,97	1,00
1	2	0,2	23,5	137,5	5,84		0,17	0,97	1,00	3	1,3	4,9	137,1	0,97	1,00
2	4	1,6	47,0	137,2	2,92		0,33	0,97	1,00	5	2,9	4,9	136,9	0,97	1,00
3	6	3,2	70,5	137,2	1,95		0,50	0,97	1,00	7	4,6	4,9	136,4	0,97	0,99
4	8	5,0	94,0	139,7	1,49		0,67	0,99	1,02	9	36,4	4,9	135,8	0,96	0,99
5	10	36,9	117,5	144,2	1,23		0,83	1,02	1,05	11	38,4	4,9	135,4	0,96	0,99
6	12	38,9	117,5	143,9	1,22		0,83	1,02	1,05	13	40,5	4,9	135,2	0,96	0,99
7	14	40,9	117,5	143,7	1,22		0,83	1,02	1,05	15	42,5	4,9	135,2	0,96	0,99
8	16	43,0	117,5	143,7	1,22		0,83	1,02	1,05	17	44,5	4,9	135,1	0,96	0,98
9	18	45,0	140,9	151,1	1,07		1,00	1,07	1,10	19	46,6	4,9	134,6	0,95	0,98
10	20	47,1	117,5	143,3	1,22		0,83	1,02	1,04	21	48,6	4,9	134,5	0,95	0,98
11	22	49,1	117,5	143,2	1,22		0,83	1,02	1,04	23	50,6	4,9	134,7	0,95	0,98
12	24	51,1	117,5	143,3	1,22		0,83	1,02	1,04	25	52,6	4,9	134,5	0,95	0,98
13	26	53,1	117,5	143,1	1,22		0,83	1,01	1,04	27	54,6	4,9	134,6	0,95	0,98
14	28	55,2	140,9	150,8	1,07		1,00	1,07	1,10	29	56,8	4,9	134,5	0,95	0,98
15	30	57,4	140,9	150,7	1,07		1,00	1,07	1,10	31	59,0	4,9	134,3	0,95	0,98
16	32	59,6	140,9	150,7	1,07		1,00	1,07	1,10	33	61,1	4,9	134,2	0,95	0,98
17	34	61,7	140,9	150,7	1,07		1,00	1,07	1,10	35	63,3	4,9	134,2	0,95	0,98
18	36	63,9	140,9	150,6	1,07		1,00	1,07	1,10	37	65,5	4,9	134,2	0,95	0,98
19	38	66,1	140,9	150,7	1,07		1,00	1,07	1,10	39	67,6	4,9	134,1	0,95	0,98
20	40	68,2	140,9	150,6	1,07		1,00	1,07	1,10	41	69,8	4,9	134,1	0,95	0,98

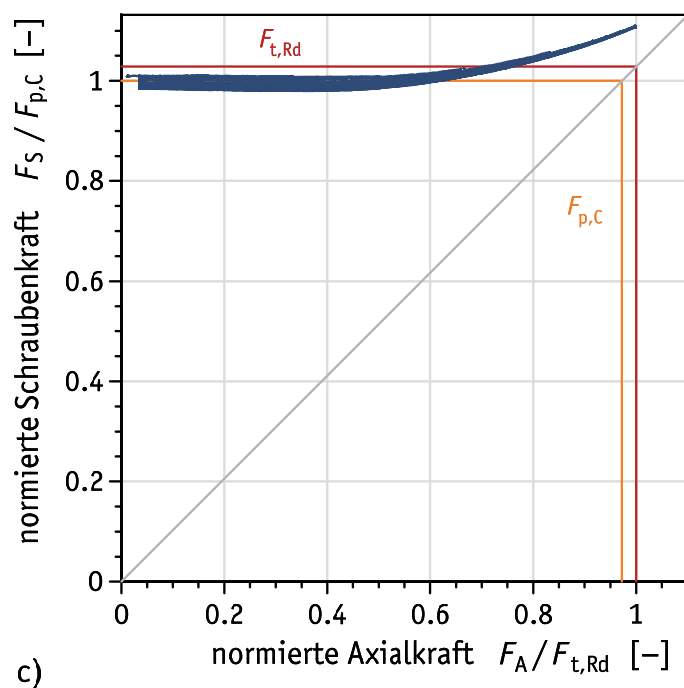
**M20 × 80 – 54 – Shr002 – H8 – Vgl – Z62**

Shr.HV | Shb.H | 46 | Shb.H | Mu.HV.rot



a)

b)



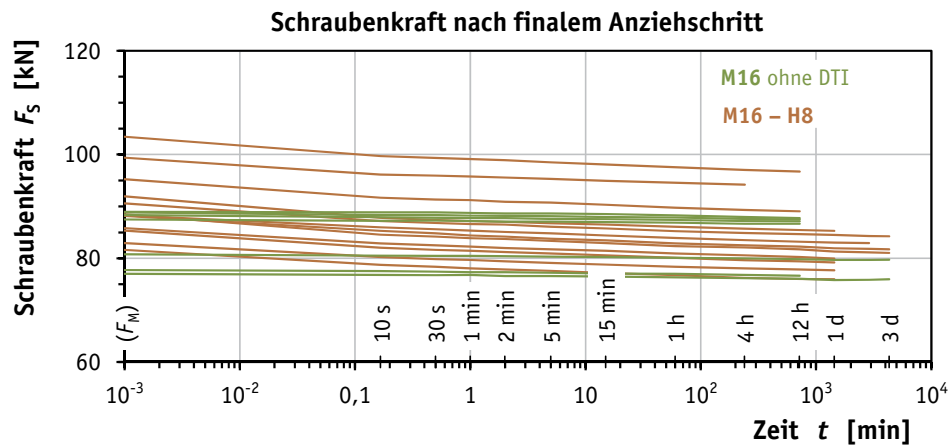
c)

**Bild C.64.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z62 (ohne DTI)**Figure C.64.** Test results: component tensile test No. Z62 (without DTI)

**Tabelle C.101.** Prüfergebnisse: Bauteil-Zugversuch Nr. Z62 (ohne DTI) – Zugversuch**Table C.101.** Test results: component tensile test No. Z62 (without DTI) – tensile test

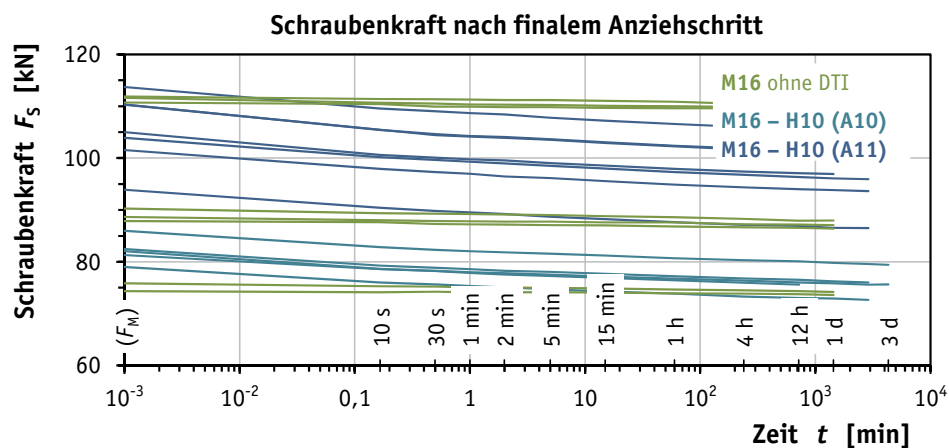
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lastwechsel Nr.	Belastung (Ursache)									Entlastung (Wirkung)					
	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,max}$ [kN]	$F_S = F_{S,max}$ [kN]	$F_S / F_A$ [-]	Klaffen =	$F_A / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]	Laststufe Nr.	Zeit $t$ [min]	$F_A = F_{A,min}$ [kN]	$F_S = F_{S,min}$ [kN]	$F_S / F_{t,Rd}$ [-]	$F_S / F_{p,C}$ [-]
<b>M20 × 80 – 54 – Shr002 – H8 – Vgl – Z62</b>															
M	M			140,6			0,00	1,00	1,03	M			140,6	1,00	1,03
0	0		0,1	138,5			0,00	0,98	1,01	1	-0,2	0,1	138,5	0,98	1,01
1	2	0,1	23,5	138,6	5,89		0,17	0,98	1,01	3	1,2	4,9	138,4	0,98	1,01
2	4	1,6	47,0	138,5	2,95		0,33	0,98	1,01	5	2,2	4,9	138,1	0,98	1,01
3	6	2,6	70,5	138,4	1,96		0,50	0,98	1,01	7	3,5	4,9	137,4	0,97	1,00
4	8	3,9	94,0	140,5	1,50		0,67	1,00	1,02	9	71,1	4,9	136,8	0,97	1,00
5	10	71,6	117,4	145,0	1,23		0,83	1,03	1,06	11	72,9	4,9	136,3	0,97	0,99
6	12	73,5	117,4	144,7	1,23		0,83	1,03	1,05	13	74,2	4,9	136,2	0,97	0,99
7	14	74,7	117,4	144,7	1,23		0,83	1,03	1,05	15	75,4	4,9	136,1	0,96	0,99
8	16	75,9	117,4	144,6	1,23		0,83	1,02	1,05	17	76,7	4,9	136,2	0,97	0,99
9	18	77,2	121,3	145,7	1,20		0,86	1,03	1,06	19	78,1	4,9	136,1	0,96	0,99
10	20	78,6	125,2	146,8	1,17		0,89	1,04	1,07	21	79,4	4,9	136,0	0,96	0,99
11	22	79,9	129,2	148,0	1,15		0,92	1,05	1,08	23	80,8	4,9	135,8	0,96	0,99
12	24	81,3	133,1	149,3	1,12		0,94	1,06	1,09	25	84,4	4,9	135,7	0,96	0,99
13	26	85,0	137,0	150,8	1,10		0,97	1,07	1,10	27	85,8	4,9	135,6	0,96	0,99
14	28	86,4	140,9	152,2	1,08		1,00	1,08	1,11	29	87,1	4,9	135,6	0,96	0,99
15	30	87,6	140,9	152,1	1,08		1,00	1,08	1,11	31	90,2	4,9	135,4	0,96	0,99
16	32	90,7	140,9	152,1	1,08		1,00	1,08	1,11	33	91,5	4,9	135,3	0,96	0,99
17	34	92,1	140,9	152,2	1,08		1,00	1,08	1,11	35	93,4	4,9	135,3	0,96	0,99
18	36	94,0	140,9	152,0	1,08		1,00	1,08	1,11	37	94,6	4,9	135,3	0,96	0,99
19	38	95,2	140,9	152,0	1,08		1,00	1,08	1,11	39	95,9	4,9	135,2	0,96	0,99
20	40	96,4	140,9	152,0	1,08		1,00	1,08	1,11	41	97,1	4,9	135,2	0,96	0,99

## C.4 Schraubenkräfte zwischen Anziehen und Zugversuch



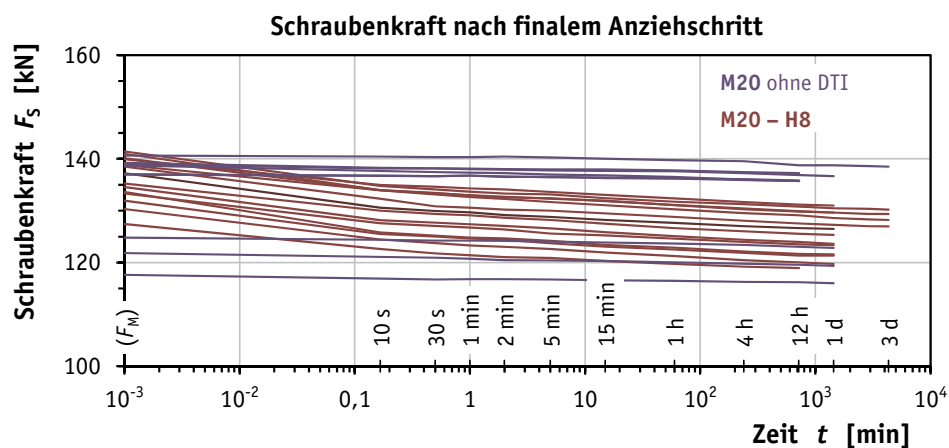
**Bild C.65.** Schraubenkraft nach finalem Anziehschritt, Serie M16 - H8

**Figure C.65.** Bolt load after the final tightening step, M16 - H8 series



**Bild C.66.** Schraubenkraft nach finalem Anziehschritt, Serie M16 - H10

**Figure C.66.** Bolt load after the final tightening step, M16 - H10 series



**Bild C.67.** Schraubenkraft nach finalem Anziehschritt, Serie M20 - H8

**Figure C.67.** Bolt load after the final tightening step, M20 - H8 series

## C.5 Vorspannkraftverluste durch Schraubenzusatzkräfte

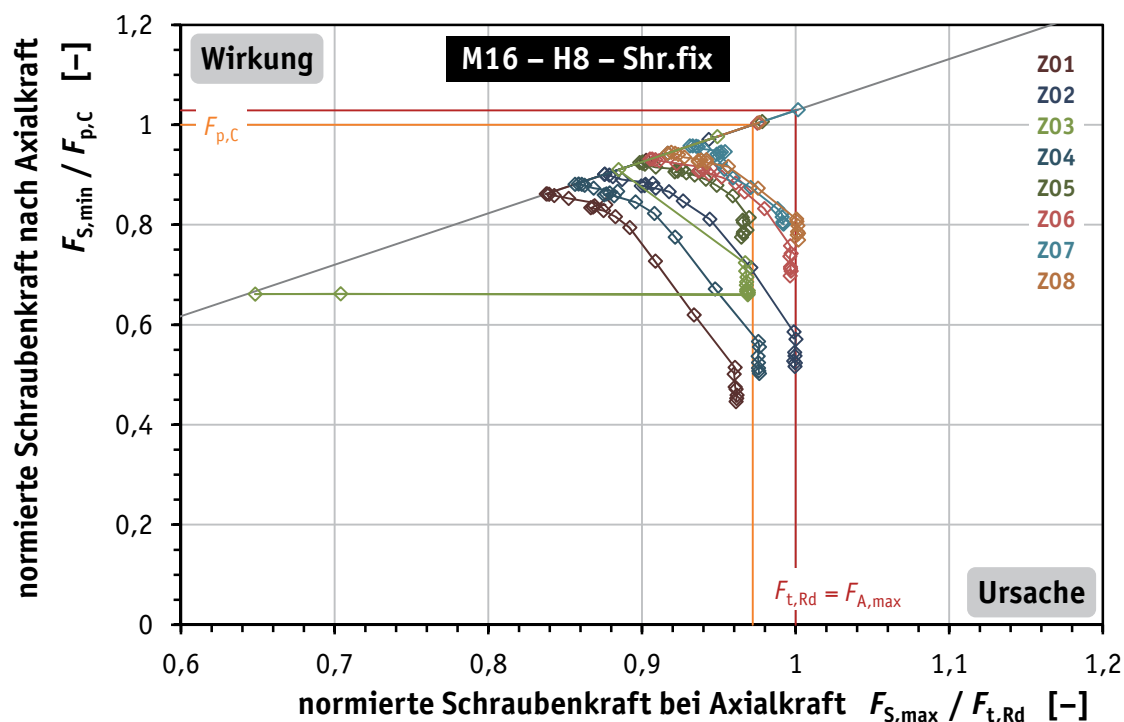


Bild C.68. Vorspannkraftverluste: Serie M16 - H8 - Shr.fix

Figure C.68. Loss of preload: M16 - H8 - Shr.fix series

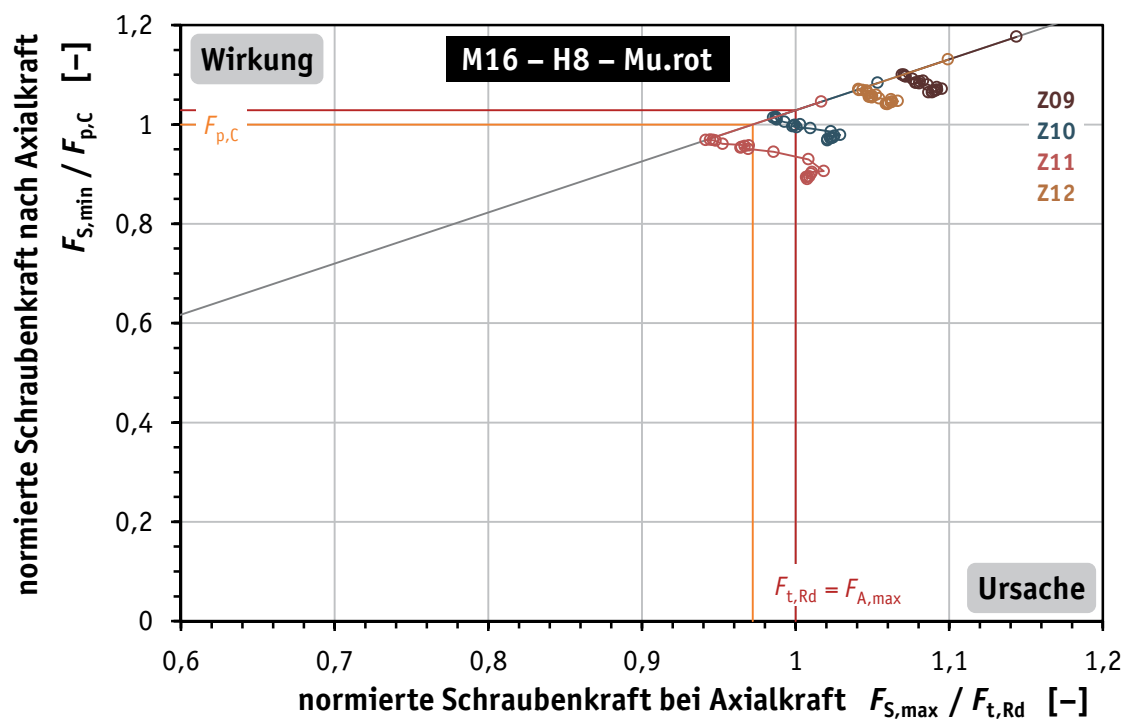
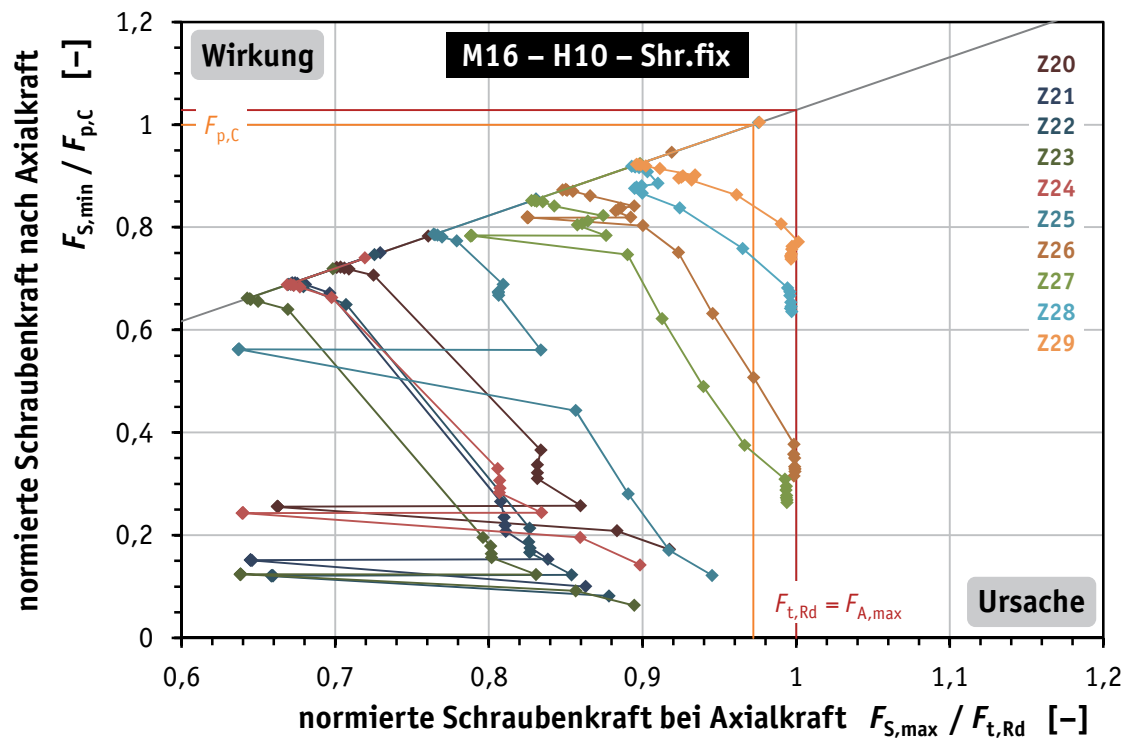


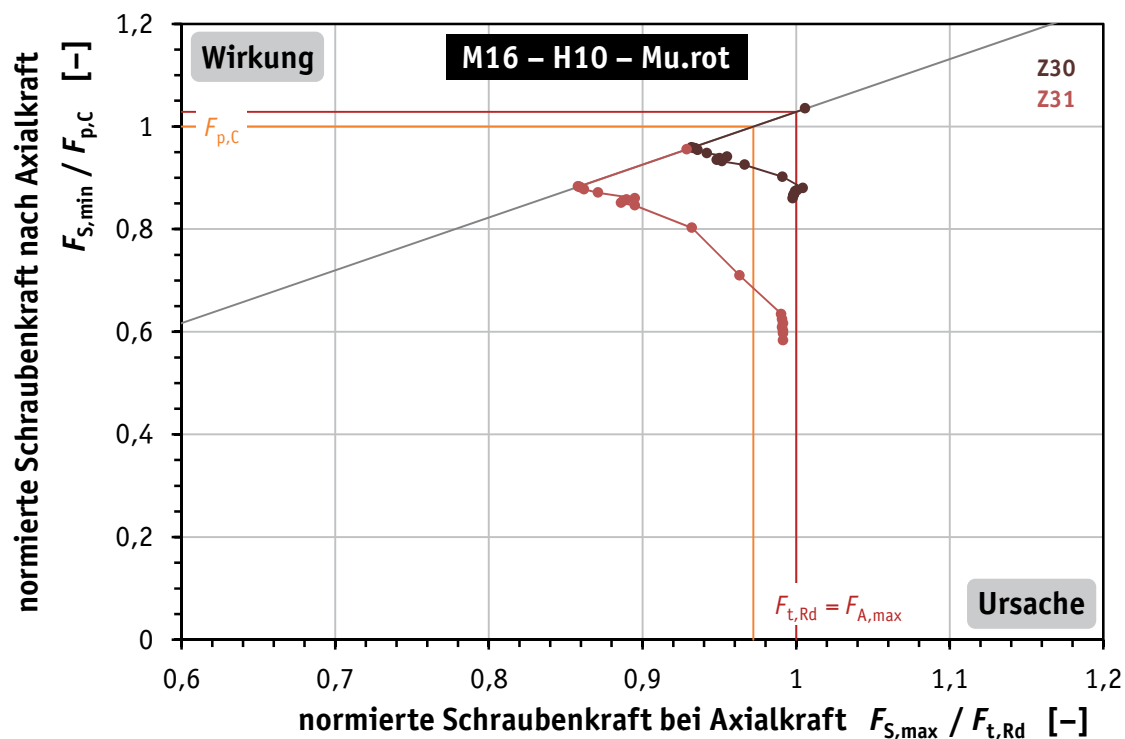
Bild C.69. Vorspannkraftverluste: Serie M16 - H8 - Mu.rot

Figure C.69. Loss of preload: M16 - H8 - Mu.rot series



**Bild C.70.** Vorspannkraftverluste: Serie M16 – H10 – Shr.fix

**Figure C.70.** Loss of preload: M16 – H10 – Shr.fix series



**Bild C.71.** Vorspannkraftverluste: Serie M16 – H10 – Mu.rot

**Figure C.71.** Loss of preload: M16 – H10 – Mu.rot series

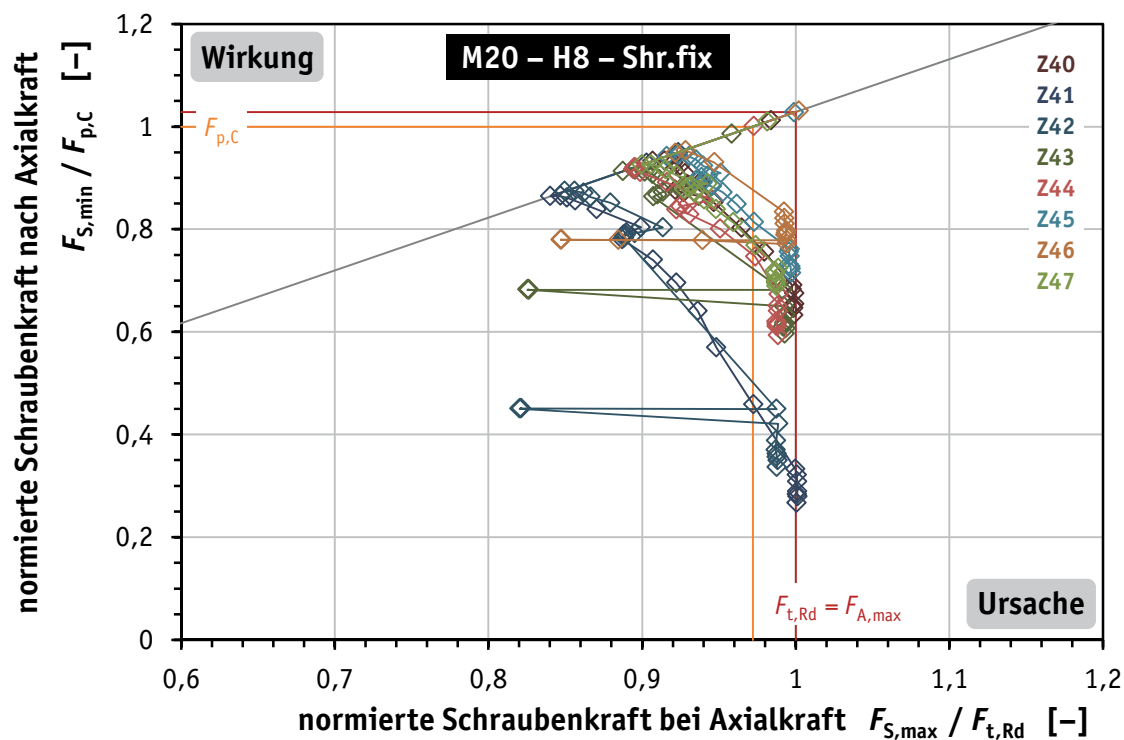


Bild C.72. Vorspannkraftverluste: Serie M20 – H8 – Shr.fix

Figure C.72. Loss of preload: M20 – H8 – Shr.fix series

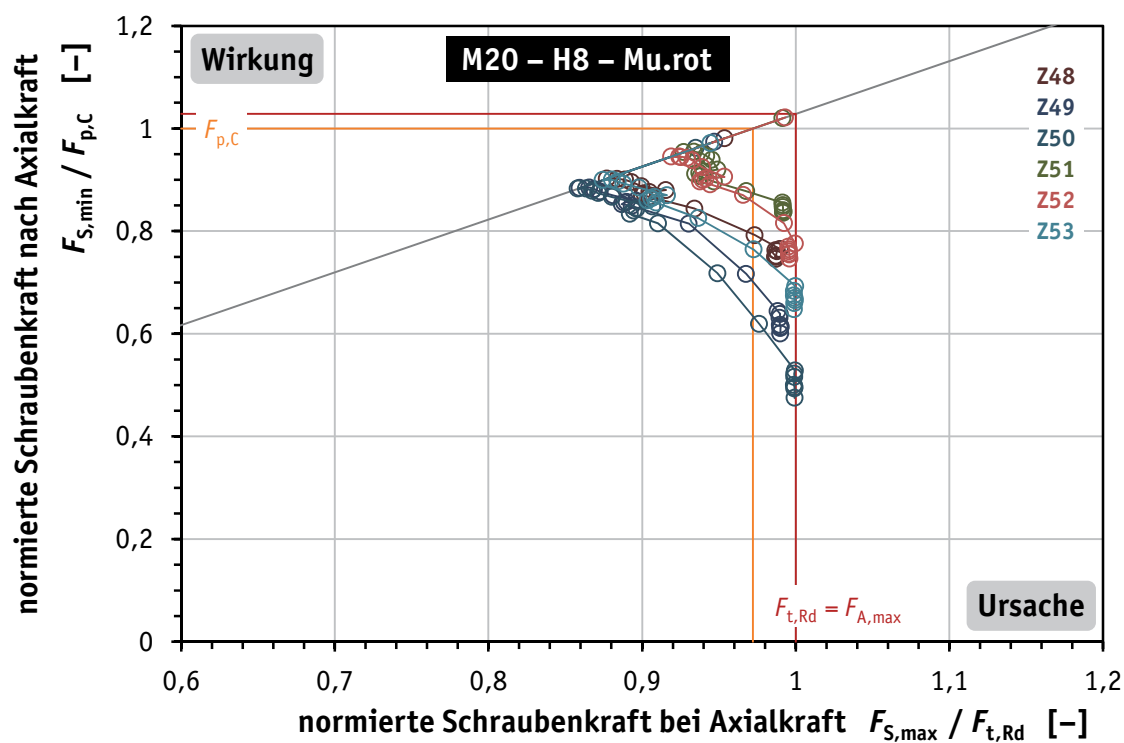
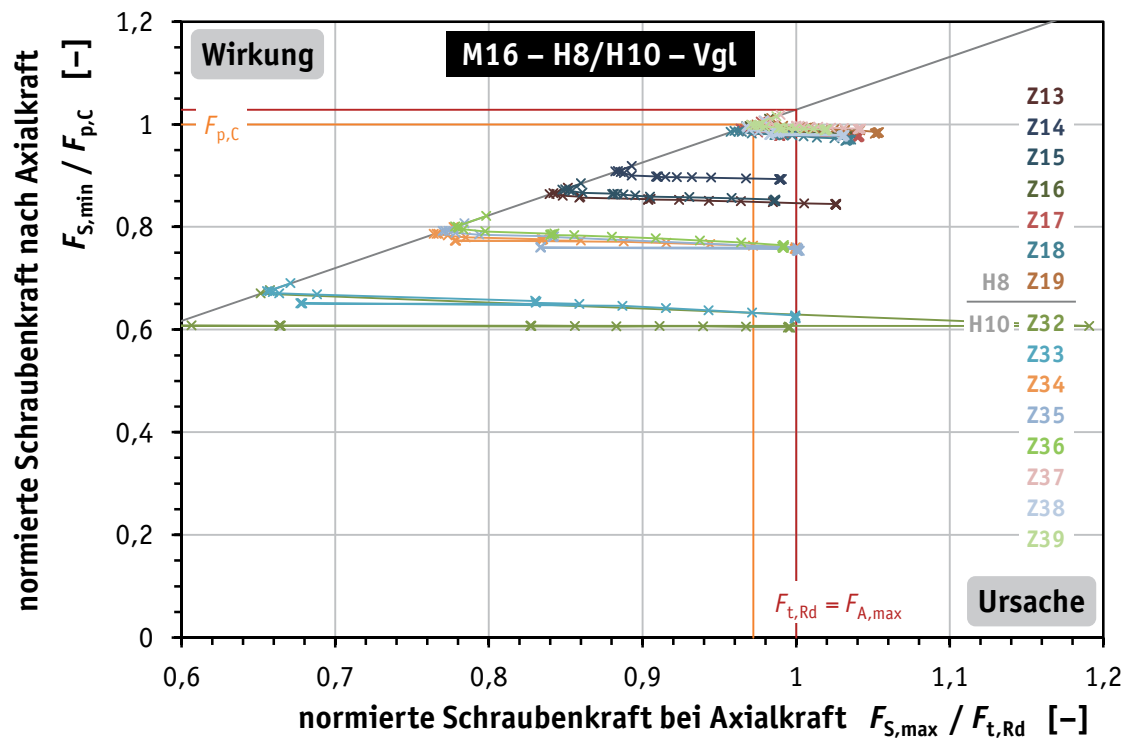


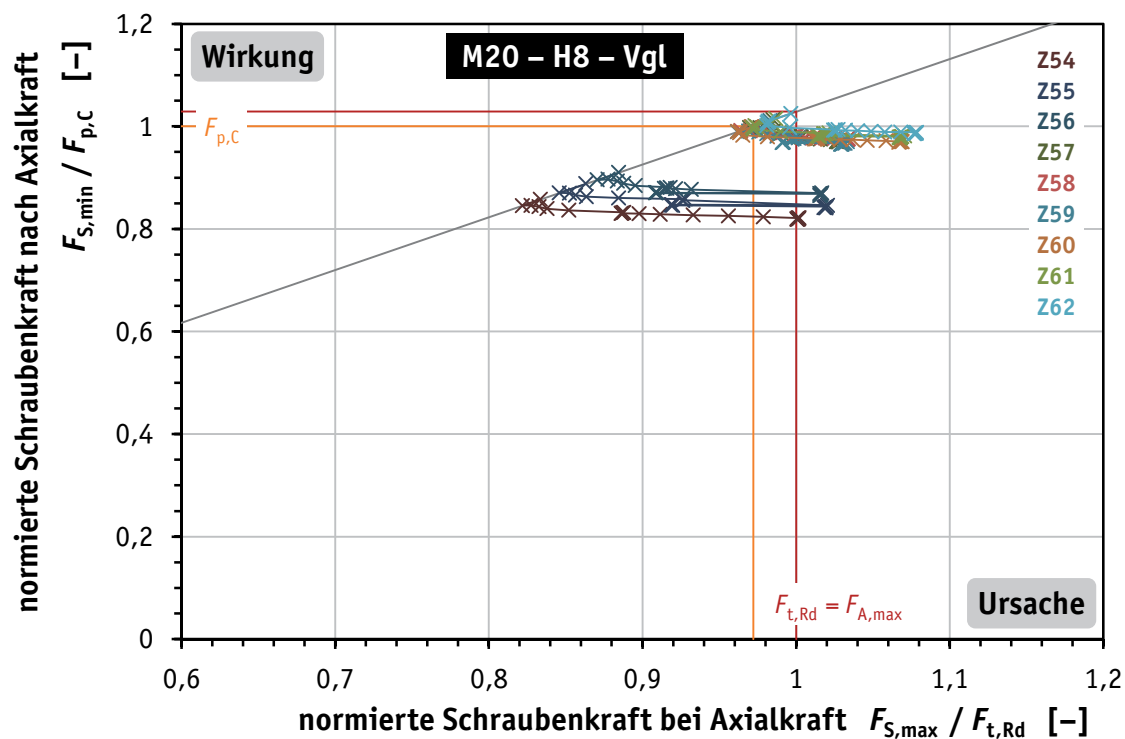
Bild C.73. Vorspannkraftverluste: Serie M20 – H8 – Mu.rot

Figure C.73. Loss of preload: M20 – H8 – Mu.rot series



**Bild C.74.** Vorspannkraftverluste: Serie M16 – H8/H10 – Vgl (ohne DTI)

**Figure C.74.** Loss of preload: M16 – H8/H10 – Vgl series (without DTI)



**Bild C.75.** Vorspannkraftverluste: Serie M20 – H8 – Vgl (ohne DTI)

**Figure C.75.** Loss of preload: M20 – H8 – Vgl series (without DTI)



**Tabelle C.102.** Vorspannkraftverluste nach Lastwechseln unter Axialkraft –  
Prüfkörper M16 mit DTI

**Table C.102.** Loss of preload as a result of cyclic loading by an axial load –  
test specimens M16 including a DTI

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Prüfung Nr.	DTI Nr.	Montagekonfiguration	Montagekriterium	Lastwechsel Nr.	Montage		Belastung				Entlastung		Überlast	Verlust	
					$\frac{F_M}{F_{p,C}}$	$\frac{F_{S,ini}}{F_{p,C}}$	$\frac{F_A}{F_{t,Rd}}$	$\frac{F_{S,max}}{F_A}$	⊥ Klaffen	$\frac{F_{S,max}}{F_{p,C}}$	$\frac{F_{S,max}}{F_M}$	$\frac{F_{S,min}}{F_{p,C}}$	$\frac{F_{S,min}}{F_{S,ini}}$	$\frac{F_{S,max}}{F_M} - 1$	$1 - \frac{F_{S,min}}{F_{S,ini}}$
					[-]	[-]	[-]	[-]	⊥	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[%]
M16 – H8 – AND-A1															
Z01	10	Shr.fix	0,4	20	0,93	0,86	1,00	0,97 =		0,99	1,06	0,45	0,52	6,5%	48,2%
Z02	11	Shr.fix	0,4	20	0,97	0,90	1,00	1,00 =		1,03	1,06	0,52	0,57	5,9%	42,7%
Z03	12	Shr.fix	0,4	14	0,98	0,91	0,99	0,97 =		1,00	1,02	0,66	0,72	2,1%	27,5%
Z04	13	Shr.fix	0,4	20	0,94	0,88	0,99	0,98 =		1,00	1,06	0,50	0,57	6,5%	43,0%
Z05	14	Shr.fix	$F_{p,C}$	20	1,01	0,92	0,99	0,97 =		0,99	0,99	0,78	0,84	-1,4%	16,1%
Z06	15	Shr.fix	$F_{p,C}$	20	1,00	0,93	0,99	1,00 =		1,02	1,02	0,70	0,75	2,2%	25,1%
Z07	16	Shr.fix	$F_{p,C}$	20	1,03	0,96	0,99	1,00 =		1,02	0,99	0,80	0,84	-0,9%	16,4%
Z08	22	Shr.fix	$F_{p,C}$	18	1,00	0,94	0,99	1,01 =		1,03	1,03	0,77	0,82	2,6%	18,4%
Z09	23	Mu.rot	0,25	18	1,18	1,10	0,99	1,09		1,12	0,95	1,06	0,97	-5,0%	3,2%
Z10	24	Mu.rot	0,25	18	1,08	1,01	0,99	1,03		1,05	0,97	0,97	0,95	-3,1%	4,5%
Z11	25	Mu.rot	0,25	18	1,05	0,97	0,99	1,01		1,04	0,99	0,89	0,92	-0,9%	8,1%
Z12	26	Mu.rot	0,25	19	1,13	1,07	0,99	1,06		1,09	0,96	1,04	0,97	-3,6%	2,8%
M16 – H10 – TS-A10															
Z20	1	Shr.fix	0,4	15	0,78	0,72	0,92	1,00 =		0,94	1,21	0,17	0,24	20,6%	76,1%
Z21	2	Shr.fix	0,4	14	0,75	0,69	0,88	0,98 =		0,89	1,18	0,10	0,14	18,3%	85,6%
Z22	3	Shr.fix	0,4	14	0,75	0,69	0,88	0,99 =		0,90	1,21	0,08	0,12	21,0%	88,2%
Z23	5	Shr.fix	0,4	15	0,72	0,66	0,92	0,97 =		0,92	1,28	0,06	0,10	28,1%	90,5%
Z24	6	Shr.fix	0,4	15	0,74	0,69	0,92	0,98 =		0,92	1,25	0,14	0,21	24,9%	79,4%
M16 – H10 – TS-A11															
Z25	6	Shr.fix	0,4	17	0,85	0,79	0,97	0,97 =		0,97	1,14	0,12	0,15	13,8%	84,5%
Z26	7	Shr.fix	0,4	24	0,95	0,87	1,00	1,00 =		1,03	1,09	0,32	0,36	8,6%	63,9%
Z27	8	Shr.fix	0,4	24	0,92	0,85	1,00	0,99 =		1,02	1,11	0,26	0,31	10,6%	69,1%
Z28	9	Shr.fix	$F_{p,C}$	18	1,00	0,92	1,00	1,00 =		1,03	1,02	0,64	0,69	2,2%	30,8%
Z29	10	Shr.fix	$F_{p,C}$	18	1,00	0,92	1,00	1,00 =		1,03	1,02	0,74	0,80	2,1%	20,0%
Z30	11	Mu.rot	0,25	18	1,03	0,96	1,00	1,00 =		1,03	0,99	0,86	0,90	-0,8%	10,3%
Z31	12	Mu.rot	0,25	18	0,96	0,88	1,00	0,99 =		1,02	1,07	0,58	0,66	6,8%	33,9%

**Tabelle C.103.** Vorspannkraftverluste nach Lastwechseln unter Axialkraft –  
Prüfkörper M20 mit DTI

**Table C.103.** Loss of preload as a result of cyclic loading by an axial load –  
test specimens M20 including a DTI

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Prüfung Nr.	DTI Nr.	Montagekonfiguration	Montagekriterium	Lastwechsel Nr.	Montage		Belastung				Entlastung		Überlast	Verlust	
					$\lfloor \frac{F_M}{F_{p,C}}$	$\lfloor \frac{F_{S,ini}}{F_{p,C}}$	$\lfloor \frac{F_A}{F_{t,Rd}}$	$\lfloor \frac{F_{S,max}}{F_A}$	= Klaffen	$\lfloor \frac{F_{S,max}}{F_{p,C}}$	$\lfloor \frac{F_{S,max}}{F_M}$	$\lfloor \frac{F_{S,min}}{F_{p,C}}$	$\lfloor \frac{F_{S,min}}{F_{S,ini}}$	$\frac{F_{S,max}}{F_M} - 1$	$1 - \frac{F_{S,min}}{F_{S,ini}}$
M20 – H8 – AND-A2															
Z40	9	Shr.fix	0,4	20	1,01	0,93	1,00	1,00 =		1,03	1,01	0,63	0,68	1,5%	32,2%
Z41	11	Shr.fix	0,4	20	0,93	0,86	1,00	1,00 =		1,03	1,11	0,27	0,31	10,8%	69,1%
Z42	12	Shr.fix	0,4	20	0,95	0,87	1,00	0,99 =		1,02	1,07	0,34	0,38	7,0%	61,5%
Z43	13	Shr.fix	0,4	20	0,99	0,91	1,00	0,99 =		1,02	1,04	0,60	0,65	3,6%	34,7%
Z44	17	Shr.fix	0,4	18	1,00	0,92	1,00	0,99 =		1,02	1,02	0,59	0,64	1,6%	35,6%
Z45	14	Shr.fix	$F_{p,C}$	20	1,03	0,94	1,00	1,00 =		1,03	1,00	0,71	0,76	-0,2%	24,2%
Z46	15	Shr.fix	$F_{p,C}$	16	1,03	0,95	1,00	1,00 =		1,02	0,99	0,77	0,81	-0,8%	18,6%
Z47	16	Shr.fix	$F_{p,C}$	20	1,01	0,93	1,00	0,99 =		1,02	1,01	0,69	0,74	0,6%	25,5%
Z48	18	Mu.rot	0,25	18	0,98	0,90	1,00	0,99 =		1,02	1,04	0,75	0,83	3,5%	17,4%
Z49	24	Mu.rot	0,25	18	0,97	0,88	1,00	0,99 =		1,02	1,05	0,60	0,68	4,5%	32,1%
Z50	25	Mu.rot	0,25	18	0,96	0,88	1,00	1,00 =		1,03	1,07	0,48	0,54	6,9%	46,2%
Z51	26	Mu.rot	0,25	18	1,02	0,95	1,00	0,99 =		1,02	1,00	0,84	0,88	0,0%	12,4%
Z52	27	Mu.rot	0,25	19	1,02	0,95	1,00	1,00 =		1,02	1,00	0,75	0,79	0,3%	21,0%
Z53	28	Mu.rot	0,25	18	0,97	0,90	1,00	1,00 =		1,03	1,06	0,65	0,72	5,8%	27,9%

**Tabelle C.104.** Vorspannkraftverluste nach Lastwechseln unter Axialkraft –  
Prüfkörper M16 und M20 ohne DTI

**Table C.104.** Loss of preload as a result of cyclic loading by an axial load –  
test specimens M16 and M20 without a DTI

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Prüfung Nr.	DTI Nr.	Montagekonfiguration	Montagekriterium	Lastwechsel Nr.	Montage		Belastung				Entlastung		Überlast	Verlust		
					$F_M / F_{p,C}$	$F_{S,ini} / F_{p,C}$	$F_A / F_{t,Rd}$	$F_{S,max} / F_A$	= Klaffen	$F_{S,max} / F_{p,C}$	$F_{S,max} / F_M$	$F_{S,min} / F_{p,C}$	$F_{S,min} / F_{S,ini}$	$F_{S,max} / F_M - 1$	$1 - F_{S,min} / F_{S,ini}$	
					[-]	[-]	[-]	[-]			[-]	[-]	[-]	[%]	[%]	
M16 – H8 – Vgl																
Z13	ohne DTI	$F_V$	21		0,88	0,86	0,99	1,03			1,06	1,21	0,84	0,98	20,5%	2,5%
Z14	ohne DTI	$F_V$	20		0,92	0,91	0,99	0,99 =			1,02	1,11	0,89	0,98	10,8%	1,8%
Z15	ohne DTI	$F_V$	20		0,88	0,87	0,99	0,99 =			1,01	1,15	0,85	0,98	14,6%	2,5%
Z16	ohne DTI	$F_{p,C}$	20		1,01	1,00	0,99	1,04			1,07	1,05	0,98	0,99	5,4%	1,4%
Z17	ohne DTI	$F_{p,C}$	20		1,00	0,99	0,99	1,05			1,07	1,06	0,97	0,98	6,5%	1,7%
Z18	ohne DTI	$F_{p,C}$	20		1,00	0,98	0,99	1,04			1,06	1,07	0,97	0,98	6,7%	1,7%
Z19	ohne DTI	$F_{p,C}$	20		1,01	1,00	0,99	1,06			1,08	1,07	0,98	0,98	6,9%	1,8%
M16 – H10 – Vgl																
Z32	ohne DTI	$F_V$	25		0,68	0,67	1,00	1,00 =			1,02	1,51	0,60	0,90	51,4%	9,8%
Z33	ohne DTI	$F_V$	24		0,69	0,67	1,00	1,00 =			1,03	1,49	0,62	0,92	48,9%	7,8%
Z34	ohne DTI	$F_V$	24		0,80	0,79	1,00	1,00 =			1,03	1,29	0,76	0,96	28,7%	3,7%
Z35	ohne DTI	$F_V$	20		0,81	0,79	1,00	1,00 =			1,03	1,28	0,75	0,95	27,6%	5,0%
Z36	ohne DTI	$F_V$	20		0,82	0,80	1,00	0,99 =			1,02	1,24	0,76	0,95	24,2%	5,2%
Z37	ohne DTI	$F_{p,C}$	20		1,02	1,01	1,00	1,04			1,07	1,05	0,99	0,98	5,1%	1,6%
Z38	ohne DTI	$F_{p,C}$	20		1,01	1,00	1,00	1,03			1,06	1,05	0,98	0,98	5,1%	2,0%
Z39	ohne DTI	$F_{p,C}$	20		1,02	1,00	1,00	1,02			1,05	1,03	0,99	0,99	3,2%	1,1%
M20 – H8 – Vgl																
Z54	ohne DTI	$F_V$	20		0,86	0,85	1,00	1,00 =			1,03	1,20	0,82	0,97	20,1%	3,1%
Z55	ohne DTI	$F_V$	20		0,89	0,87	1,00	1,02			1,05	1,18	0,84	0,97	18,1%	3,4%
Z56	ohne DTI	$F_V$	22		0,91	0,90	1,00	1,02			1,04	1,15	0,87	0,97	14,8%	3,4%
Z57	ohne DTI	$F_{p,C}$	20		1,01	1,00	1,00	1,03			1,06	1,04	0,97	0,97	4,2%	2,8%
Z58	ohne DTI	$F_{p,C}$	20		1,00	0,99	1,00	1,04			1,06	1,06	0,97	0,98	6,4%	1,7%
Z59	ohne DTI	$F_{p,C}$	20		1,01	0,99	1,00	1,03			1,06	1,05	0,97	0,98	4,7%	2,5%
Z60	ohne DTI	$F_{p,C}$	20		1,00	0,99	1,00	1,07			1,10	1,10	0,97	0,98	9,9%	2,1%
Z61	ohne DTI	$F_{p,C}$	20		1,01	1,00	1,00	1,07			1,10	1,08	0,98	0,98	8,2%	2,4%
Z62	ohne DTI	$F_V$	20		1,03	1,01	1,00	1,08			1,11	1,08	0,99	0,98	8,1%	2,4%

## C.6 Montagevorspannkkräfte aus Anziehversuchen und Bauteil-Zugversuchen

**Tabelle C.105.** Montagevorspannkkräfte bei Erreichen des Fühllehren-Kriteriums, Serie M16 – H8, Zusammenfassung von Anziehversuchen und Bauteil-Zugversuchen

**Table C.105.** Assembly preloads upon reaching the feeler gauge criterion, M16 – H8 series, summary of tightening tests and component tensile tests

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Prüfung Nr.	DTI Nr.	Montage-konfiguration	erf. Fühllehre [mm]	Schmierung (A) Montagekrit. (Z)	Anziehschritt zu $F_s$	$F_s$ [kN]	$F_s / F_{ub}$ [-]	$F_s / F_{p,c}$ [-]	$F_s / F_{p,c} - 1$	$n_{refusal}$ [-]	$n_{gap}$ [-]	$n_{refusal} / n_{gap}$	$h_{gap,m}$ [mm]	$R / 2$ [mm]	$h_{gap,m}$	$h_{gap,inf}$	Bewertung
<b>M16 – H8 – AND-A1</b>																	
A01	6	Shr.fix	0,4	K1	2	88,5	0,7	1,01		3	4		0,35	±0,13			n.i.O.
A02	7	Shr.fix	0,4	K1	3	88,3	0,7	1,0		3	4		0,36	±0,1			n.i.O.
A03	8	Shr.fix	0,4	K1	3	88,4	0,7	1,01		4	4		0,3	±0,13			n.i.O.
A04	9	Shr.fix	0,4	K1	3	88,3	0,7	1,0		4	4		0,35	±0,08			n.i.O.
Z01	10	Shr.fix	0,4	0,4	5	81,6	0,65	0,93		3	4		0,34	±0,1			n.i.O.
Z02	11	Shr.fix	0,4	0,4	6	85,3	0,68	0,97		3	4		0,35	±0,12			n.i.O.
Z03	12	Shr.fix	0,4	0,4	8	85,8	0,68	0,98		3	4		0,29	±0,18			n.i.O.
Z04	13	Shr.fix	0,4	0,4	6	83,0	0,66	0,94		3	4		0,3	±0,21			n.i.O.
Z05	14	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	88,5	0,7	1,01		4	4		0,29	±0,09			n.i.O.
Z06	15	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	88,2	0,7	1,0		4	4		0,3	±0,1			n.i.O.
Z07	16	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	90,6	0,72	1,03		4	4		0,19	±0,09			k.A.
Z08	22	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	88,3	0,7	1,0		4	4		0,24	±0,1			n.i.O.
A05	17	Mu.rot	0,25	K1	6	100,3	0,8	1,14		4	4		0,12	±0,11			i.O.
A06	18	Mu.rot	0,25	K1	4	91,4	0,73	1,04		3	4		0,24	±0,15			i.O.
A07	19	Mu.rot	0,25	K1	5	94,5	0,75	1,07		3	4		0,14	±0,18			i.O.
A08	20	Mu.rot	0,25	K1	4	91,4	0,73	1,04		3	4		0,21	±0,17			i.O.
A09	21	Mu.rot	0,25	K1	5	94,4	0,75	1,07		3	4		0,17	±0,18			i.O.
Z09	23	Mu.rot	0,25	0,25	9	103,5	0,82	1,18		3	4		0,14	±0,14			i.O.
Z10	24	Mu.rot	0,25	0,25	4	95,4	0,76	1,08		3	4		0,18	±0,2			i.O.
Z11	25	Mu.rot	0,25	0,25	1	92,0	0,73	1,05		3	4		0,22	±0,23			i.O.
Z12	26	Mu.rot	0,25	0,25	10	99,5	0,79	1,13		4	4		0,12	±0,13			i.O.

**Tabelle C.106.** Montagevorspannkkräfte bei Erreichen des Fühllehren-Kriteriums, Serien M16 – H10, Zusammenfassung von Anziehversuchen und Bauteil-Zugversuchen

**Table C.106.** Assembly preloads upon reaching the feeler gauge criterion, M16 – H10 series, summary of tightening tests and component tensile tests

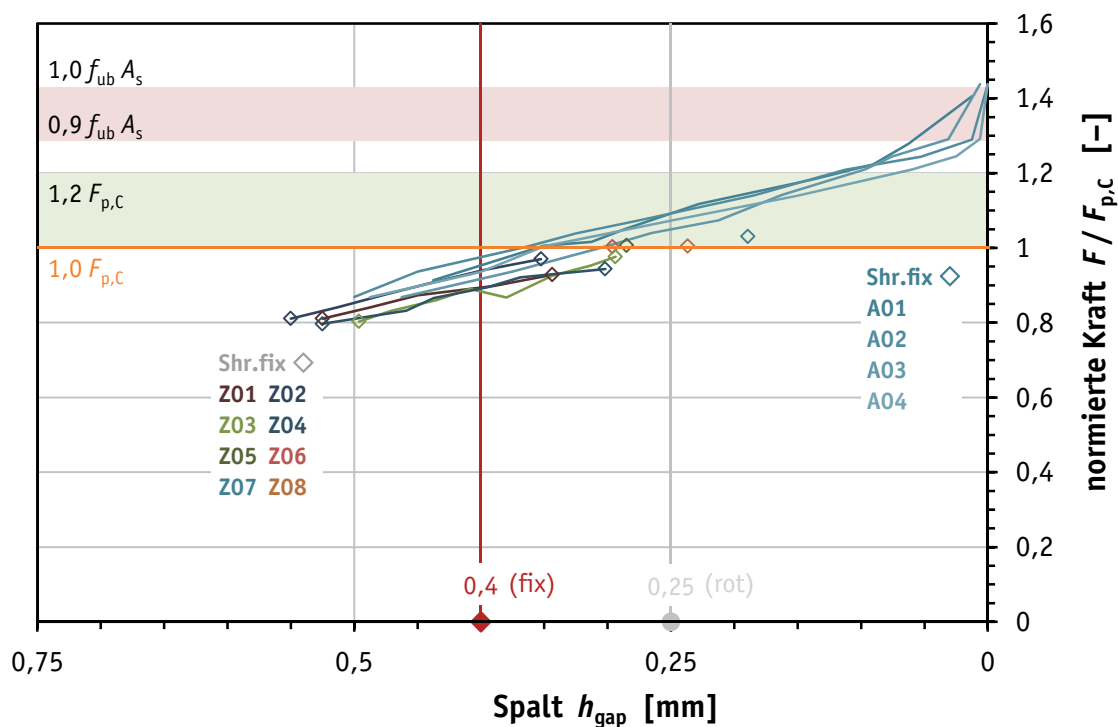
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Prüfung Nr.	DTI Nr.	Montage-konfiguration	erf. Fühllehre [mm]	Schmierung (A) Montagekrit. (Z)	Anziehschritt zu $F_s$	$F_s$ [kN]	$F_s / F_{ub}$ [-]	$F_s / F_{p,c}$ [-]	$F_s / F_{p,c} - 1$	$n_{refusal}$ [-]	$n_{gap}$ [-]	$n_{refusal} / n_{gap}$	$h_{gap,m}$ [mm]	$R / 2$ [mm]	$h_{gap,m}$	$h_{gap,inf}$	Bewertung
<b>M16 – H10 – TS-A10</b>																	
A10	11 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	K1	1	94,0	0,6	0,86		4	4		0,31 ±0,1				n.i.O.
A11	12 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	K1	1	94,0	0,6	0,86		3	4		0,26 ±0,15				n.i.O.
A12	13 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	K1	1	94,0	0,6	0,86		4	4		0,29 ±0,05				n.i.O.
A13	14 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	ohne	1	94,0	0,6	0,86		4	4		0,24 ±0,11				n.i.O.
A14	15 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	ohne	1	94,0	0,6	0,86		3	4		0,25 ±0,2				n.i.O.
A15	16 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	ohne	1	94,0	0,6	0,86		4	4		0,26 ±0,1				n.i.O.
Z20	1	Shr.fix	0,4	0,4	1	86,0	0,55	0,78		3	4		0,3 ±0,13				n.i.O.
Z21	2	Shr.fix	0,4	0,4	5	82,5	0,53	0,75		3	4		0,37 ±0,07				n.i.O.
Z22	3	Shr.fix	0,4	0,4	5	82,0	0,52	0,75		3	4		0,36 ±0,08				n.i.O.
Z63	4	Shr.fix	0,4	0,4	5	83,5	0,53	0,76		3	4		0,37 ±0,14				n.i.O.
Z23	5	Shr.fix	0,4	0,4	5	79,0	0,5	0,72		3	4		0,33 ±0,14				n.i.O.
Z24	6	Shr.fix	0,4	0,4	5	81,3	0,52	0,74		4	4		0,35 ±0,08				n.i.O.
A16	04 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	K1	1	110,0	0,7	1,0		4	4		0,13 ±0,13				n.i.O.
A17	05 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	K1	1	110,0	0,7	1,0		4	4		0,13 ±0,13				n.i.O.
A18	06 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	K1	1	110,0	0,7	1,0		4	4		0,19 ±0,06				n.i.O.
A19	07 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	ohne	1	110,0	0,7	1,0		4	4		0,13 ±0,13				n.i.O.
A20	08 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	ohne	1	110,0	0,7	1,0		4	4		0,13 ±0,13				n.i.O.
A21	09 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	ohne	1	110,0	0,7	1,0		4	4		0,16 ±0,13				n.i.O.
<b>M16 – H10 – TS-A11</b>																	
Z25	6	Shr.fix	0,4	0,4	5	93,9	0,6	0,85		3	4		0,37 ±0,07				n.i.O.
Z26	7	Shr.fix	0,4	0,4	8	103,9	0,66	0,95		3	4		0,28 ±0,15				n.i.O.
Z27	8	Shr.fix	0,4	0,4	11	101,6	0,65	0,92		4	4		0,29 ±0,11				n.i.O.
Z28	9	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	110,3	0,7	1,0		4	4		0,13 ±0,14				n.i.O.
Z29	10	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	110,3	0,7	1,0		4	4		0,1 ±0,11				n.i.O.
Z30	11	Mu.rot	0,25	0,25	9	113,7	0,72	1,03		3	4		0,15 ±0,18				i.O.
Z31	12	Mu.rot	0,25	0,25	3	105,0	0,67	0,96		3	4		0,18 ±0,2				n.i.O.

**Tabelle C.107.** Montagevorspannkkräfte bei Erreichen des Fühllehren-Kriteriums, Serien M20, Zusammenfassung von Anziehversuchen und Bauteil-Zugversuchen

**Table C.107.** Assembly preloads upon reaching the feeler gauge criterion, M20 series, summary of tightening tests and component tensile tests

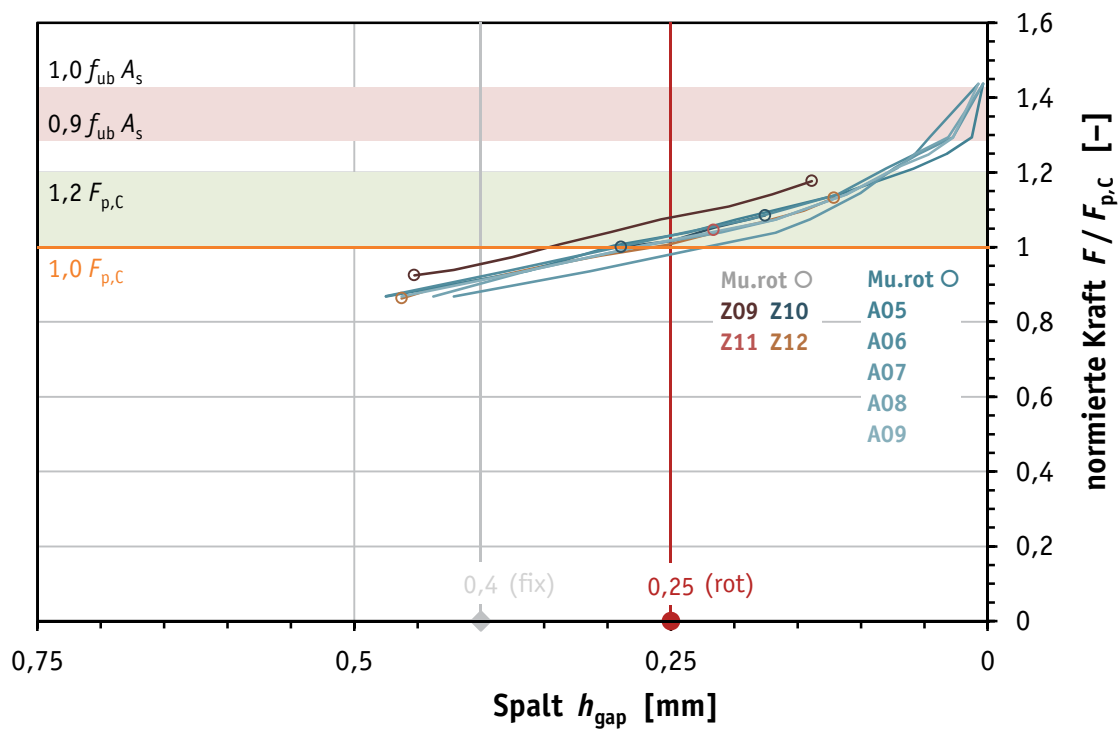
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Prüfung Nr.	DTI Nr.	Montage-konfiguration	erf. Fühllehre [mm]	Schmierung (A) Montagekrit. (Z)	Anziehschritt zu $F_s$	$F_s$ [kN]	$F_s / F_{ub}$ [-]	$F_s / F_{p,c}$ [-]	$F_s / F_{p,c} - 1$	$n_{refusal}$ [-]	$n_{gap}$ [-]	$n_{refusal} / n_{gap}$	$h_{gap,m}$ [mm]	$R/2$ [mm]	$h_{gap,m}$	$h_{gap,inf}$	Bewertung
<b>M20 – H8 – AND-A2</b>																	
A53	6	Shr.fix	0,4	K1	4	142,9	0,73	1,04		4	5		0,33	±0,1			i.o.
A54	7	Shr.fix	0,4	K1	4	142,5	0,73	1,04		3	5		0,39	±0,07			i.o.
A55	8	Shr.fix	0,4	K1	4	142,6	0,73	1,04		3	5		0,37	±0,09			i.o.
Z40	9	Shr.fix	0,4	0,4	3	138,8	0,71	1,01		5	5		0,35	±0,05			n.i.O.
Z64	10	Shr.fix	0,4	0,4	4	139,3	0,71	1,01		3	5		0,38	±0,1			n.i.O.
Z41	11	Shr.fix	0,4	0,4	1	127,4	0,65	0,93		3	5		0,39	±0,13			n.i.O.
Z42	12	Shr.fix	0,4	0,4	1	130,3	0,66	0,95		4	5		0,35	±0,1			n.i.O.
Z43	13	Shr.fix	0,4	0,4	2	135,2	0,69	0,99		5	5		0,36	±0,04			n.i.O.
Z44	17	Shr.fix	0,4	0,4	5	137,3	0,7	1,0		3	5		0,4	±0,05			n.i.O.
Z45	14	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	141,0	0,72	1,03		5	5		0,31	±0,05			k.A.
Z46	15	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	141,4	0,72	1,03		5	5		0,2	±0,05			k.A.
Z47	16	Shr.fix	0,4	$F_{p,c}$	1	138,5	0,71	1,01		5	5		0,22	±0,04			n.i.O.
A56	19	Mu.rot	0,25	K1	5	146,7	0,75	1,07		3	5		0,21	±0,14			i.o.
A57	20	Mu.rot	0,25	K1	5	146,7	0,75	1,07		3	5		0,23	±0,1			i.o.
A58	21	Mu.rot	0,25	K1	5	146,6	0,75	1,07		3	5		0,2	±0,1			i.o.
A59	22	Mu.rot	0,25	K1	4	142,6	0,73	1,04		3	5		0,27	±0,16			i.o.
A60	23	Mu.rot	0,25	K1	6	155,4	0,79	1,13		4	5		0,14	±0,14			i.o.
Z48	18	Mu.rot	0,25	0,25	5	134,6	0,69	0,98		3	5		0,22	±0,16			n.i.O.
Z49	24	Mu.rot	0,25	0,25	3	133,6	0,68	0,97		3	5		0,2	±0,2			n.i.O.
Z50	25	Mu.rot	0,25	0,25	3	132,0	0,67	0,96		3	5		0,26	±0,17			n.i.O.
Z51	26	Mu.rot	0,25	0,25	3	139,9	0,71	1,02		4	5		0,14	±0,14			i.o.
Z52	27	Mu.rot	0,25	0,25	4	140,1	0,72	1,02		3	5		0,22	±0,2			i.o.
Z53	28	Mu.rot	0,25	0,25	3	133,3	0,68	0,97		3	5		0,2	±0,23			n.i.O.
<b>M20 – H10 – TS-22AA</b>																	
A61	11 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	K1	2	160,0	0,65	0,93		4	6		0,26	±0,28			n.i.O.
A62	12 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	K1	2	160,0	0,65	0,93		5	6		0,29	±0,15			n.i.O.
A63	13 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	K1	3	172,0	0,7	1,0		4	6		0,27	±0,25			n.i.O.
A64	14 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	ohne	2	160,0	0,65	0,93		4	6		0,33	±0,21			n.i.O.
A65	15 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	ohne	Bruch					–	6		–	–			
A66	16 <sup>b</sup>	Shr.fix	0,4	ohne	2	160,0	0,65	0,93		4	6		0,27	±0,25			n.i.O.
A67	05 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	K1	4	206,0	0,84	1,2		6	6		0,15	±0,13			i.o.
A68	06 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	K1	3	195,0	0,8	1,14		4	6		0,18	±0,2			i.o.
A69	07 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	K1	3	195,0	0,8	1,14		4	6		0,23	±0,14			i.o.
A70	08 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	ohne	2	183,0	0,75	1,07		4	6		0,16	±0,2			i.o.
A71	09 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	ohne	3	195,0	0,8	1,14		4	6		0,17	±0,2			i.o.
A72	10 <sup>a</sup>	Mu.rot	0,25	ohne	3	195,0	0,8	1,14		4	6		0,19	±0,2			i.o.

## C.7 Last-Verformung-Verhalten des DTI



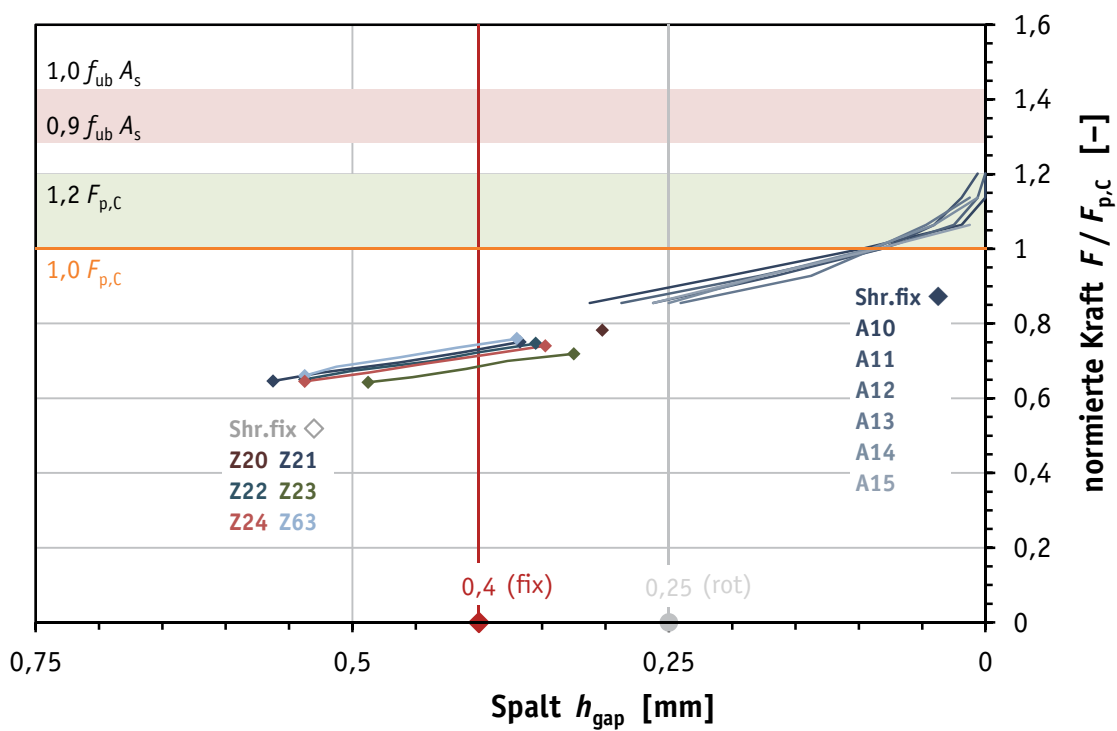
**Bild C.76.** Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M16-H8-AND-A1 – Shr.fix (Zv und Av)

**Figure C.76.** Gap-load-diagram for M16-H8-AND-A1 – Shr.fix series (Zv and Av)



**Bild C.77.** Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M16-H8-AND-A1 – Mu.rot (Zv und Av)

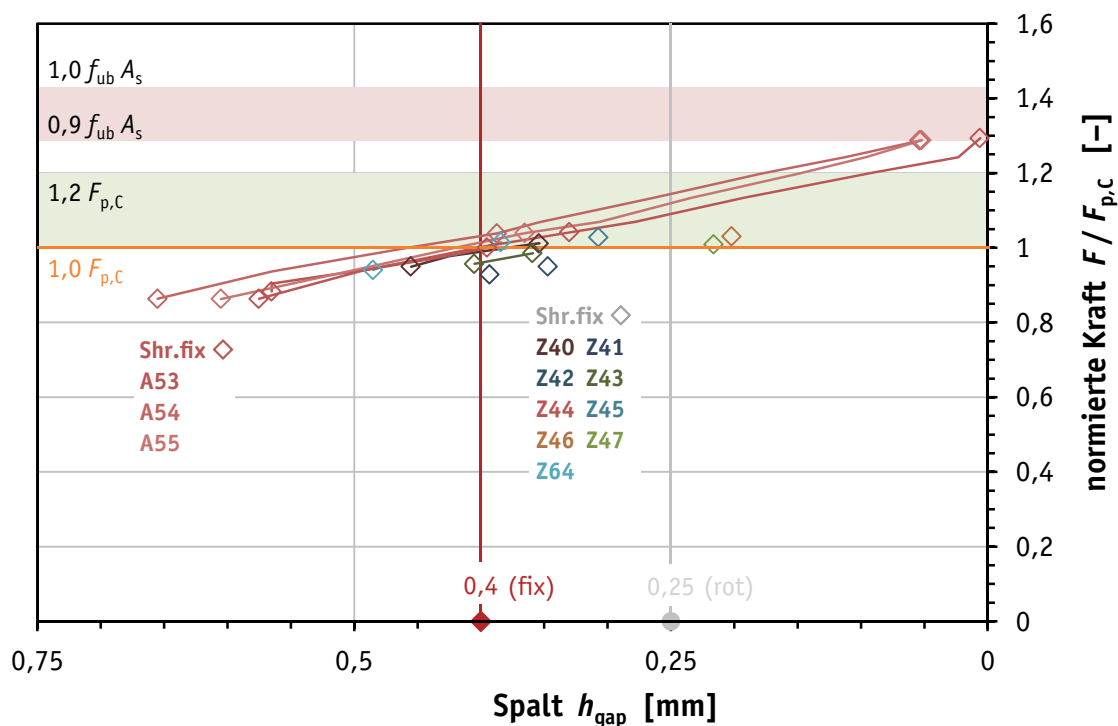
**Figure C.77.** Gap-load-diagram for M16-H8-AND-A1 – Mu.rot series (Zv and Av)



**Bild C.78.** Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M16-H10-TS-A10 – Shr.fix (Zv und Av)

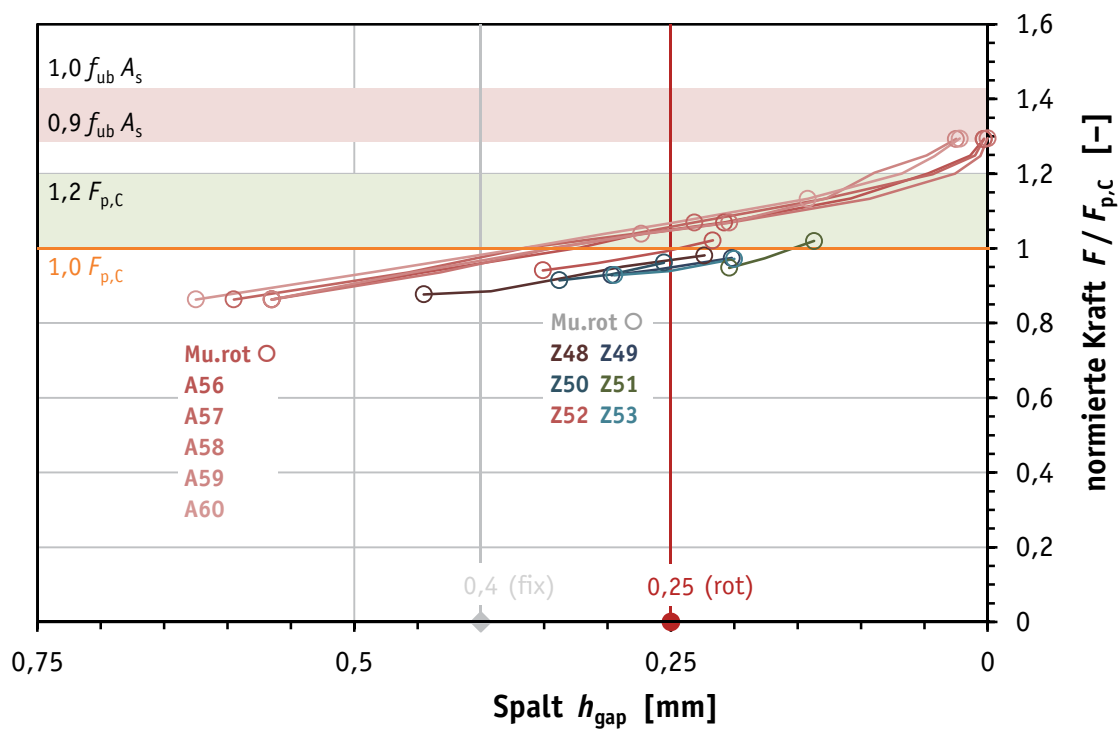
**Figure C.78.** Gap-load-diagram for M16-H10-TS-A10 – Shr.fix series (Zv and Av)





**Bild C.79.** Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M20-H8-AND-A2 – Shr.fix (Zv und Av)

**Figure C.79.** Gap-load-diagram for M20-H8-AND-A2 – Shr.fix series (Zv and Av)



**Bild C.80.** Spalt-Kraft-Diagramm für Serie M20-H8-AND-A2 – Mu.rot (Zv und Av)

**Figure C.80.** Gap-load-diagram for M20-H8-AND-A2 – Mu.rot series (Zv and Av)



## Anhang D Modellbildung mit direkten Kraftanzeigern

### D.1 Nachgiebigkeit von Schraubengarnituren und Bauteilen

**Tabelle D.1.** Elastische Nachgiebigkeit der Schraubengarnituren

**Table D.1.** Elastic resilientces of the bolting assemblies

	$d$	$l_{\text{nom}}$	$l_{s,\text{min}}$	$l_{g,\text{max}}$	$\Sigma t$	$l_{\text{SK}}$	$l_{\text{Sch}}$	$l_{\text{Gew}}$	$l_{\text{G}}$	$l_{\text{M}}$	$A_{\text{N}}$	$A_{\text{d3}}$	$\delta_{\text{SK}}$	$\delta_{\text{Sch}}$	$\delta_{\text{Gew}}$	$\delta_{\text{G}}$	$\delta_{\text{M}}$	$\delta_{\text{S}}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[μm/kN]	[μm/kN]	[μm/kN]	[μm/kN]	[μm/kN]	[μm/kN]
<b>Z01</b>	16	90	56	62	70	8	59	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,364	0,264	0,152	2,367
<b>Z02</b>	16	90	56	62	70	8	59	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,364	0,264	0,152	2,367
<b>Z03</b>	16	100	66	72	80	8	69	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,635	0,364	0,264	0,152	2,604
<b>Z04</b>	16	100	66	72	80	8	69	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,635	0,364	0,264	0,152	2,604
<b>Z05</b>	16	90	56	62	70	8	59	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,364	0,264	0,152	2,367
<b>Z06</b>	16	90	56	62	70	8	59	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,364	0,264	0,152	2,367
<b>Z07</b>	16	100	66	72	80	8	69	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,635	0,364	0,264	0,152	2,604
<b>Z08</b>	16	100	66	72	80	8	69	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,635	0,364	0,264	0,152	2,604
<b>Z09</b>	16	90	56	62	70	8	59	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,364	0,264	0,152	2,367
<b>Z10</b>	16	90	56	62	70	8	59	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,364	0,264	0,152	2,367
<b>Z11</b>	16	100	66	72	80	8	69	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,635	0,364	0,264	0,152	2,604
<b>Z12</b>	16	100	66	72	80	8	69	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,635	0,364	0,264	0,152	2,604
<b>Z13</b>	16	90	56	62	71	8	59	12	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,397	0,264	0,152	2,400
<b>Z14</b>	16	90	56	62	71	8	59	12	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,397	0,264	0,152	2,400
<b>Z15</b>	16	100	66	72	81	8	69	12	8	6,4	201	144,1	0,190	1,635	0,397	0,264	0,152	2,637
<b>Z16</b>	16	90	56	62	71	8	59	12	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,397	0,264	0,152	2,400
<b>Z17</b>	16	90	56	62	71	8	59	12	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,397	0,264	0,152	2,400
<b>Z18</b>	16	100	66	72	81	8	69	12	8	6,4	201	144,1	0,190	1,635	0,397	0,264	0,152	2,637
<b>Z19</b>	16	100	66	72	78	8	69	9	8	6,4	201	144,1	0,190	1,635	0,297	0,264	0,152	2,538
<b>Z20</b>	16	100	66	72	80	8	69	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,635	0,364	0,264	0,152	2,604
<b>Z21</b>	16	90	56	62	70	8	59	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,364	0,264	0,152	2,367
<b>Z22</b>	16	90	56	62	70	8	59	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,364	0,264	0,152	2,367
<b>Z23</b>	16	90	56	62	70	8	59	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,364	0,264	0,152	2,367
<b>Z24</b>	16	100	66	72	80	8	69	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,635	0,364	0,264	0,152	2,604
<b>Z25</b>	16	90	56	62	70	8	59	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,364	0,264	0,152	2,367
<b>Z26</b>	16	90	56	62	70	8	59	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,364	0,264	0,152	2,367
<b>Z27</b>	16	90	56	62	70	8	59	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,364	0,264	0,152	2,367
<b>Z28</b>	16	90	56	62	70	8	59	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,364	0,264	0,152	2,367
<b>Z29</b>	16	90	56	62	70	8	59	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,364	0,264	0,152	2,367
<b>Z30</b>	16	90	56	62	70	8	59	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,364	0,264	0,152	2,367
<b>Z31</b>	16	90	56	62	70	8	59	11	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,364	0,264	0,152	2,367
<b>Z32</b>	16	90	56	62	71	8	59	12	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,397	0,264	0,152	2,400
<b>Z33</b>	16	100	66	72	81	8	69	12	8	6,4	201	144,1	0,190	1,635	0,397	0,264	0,152	2,637
<b>Z34</b>	16	90	56	62	71	8	59	12	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,397	0,264	0,152	2,400
<b>Z35</b>	16	90	56	62	71	8	59	12	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,397	0,264	0,152	2,400
<b>Z36</b>	16	90	56	62	71	8	59	12	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,397	0,264	0,152	2,400
<b>Z37</b>	16	90	56	62	71	8	59	12	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,397	0,264	0,152	2,400
<b>Z38</b>	16	90	56	62	71	8	59	12	8	6,4	201	144,1	0,190	1,398	0,397	0,264	0,152	2,400
<b>Z39</b>	16	100	66	72	81	8	69	12	8	6,4	201	144,1	0,190	1,635	0,397	0,264	0,152	2,637

Fortsetzung

Tabelle D.1. fortgesetzt

Table D.1. continued

	$d$	$l_{nom}$	$l_{s,min}$	$l_{g,max}$	$\Sigma t$	$l_{SK}$	$l_{Sch}$	$l_{Gew}$	$l_G$	$l_M$	$A_N$	$A_{d3}$	$\delta_{SK}$	$\delta_{Sch}$	$\delta_{Gew}$	$\delta_G$	$\delta_M$	$\delta_s$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[μm/kN]	[μm/kN]	[μm/kN]	[μm/kN]	[μm/kN]	[μm/kN]
<b>Z40</b>	20	110	69,5	77	82	10	73	9	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,185	0,211	0,121	1,780
<b>Z41</b>	20	110	69,5	77	82	10	73	9	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,185	0,211	0,121	1,780
<b>Z42</b>	20	110	69,5	77	82	10	73	9	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,185	0,211	0,121	1,780
<b>Z43</b>	20	110	69,5	77	82	10	73	9	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,185	0,211	0,121	1,780
<b>Z44</b>	20	80	39,5	47	53	10	43	10	10	8	314	225,2	0,152	0,656	0,206	0,211	0,121	1,346
<b>Z45</b>	20	110	69,5	77	82	10	73	9	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,185	0,211	0,121	1,780
<b>Z46</b>	20	110	69,5	77	82	10	73	9	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,185	0,211	0,121	1,780
<b>Z47</b>	20	110	69,5	77	82	10	73	9	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,185	0,211	0,121	1,780
<b>Z48</b>	20	110	69,5	77	86	10	73	13	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,270	0,211	0,121	1,865
<b>Z49</b>	20	110	69,5	77	86	10	73	13	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,270	0,211	0,121	1,865
<b>Z50</b>	20	110	69,5	77	86	10	73	13	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,270	0,211	0,121	1,865
<b>Z51</b>	20	110	69,5	77	86	10	73	13	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,270	0,211	0,121	1,865
<b>Z52</b>	20	110	69,5	77	86	10	73	13	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,270	0,211	0,121	1,865
<b>Z53</b>	20	110	69,5	77	86	10	73	13	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,270	0,211	0,121	1,865
<b>Z54</b>	20	110	69,5	77	83	10	73	10	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,206	0,211	0,121	1,801
<b>Z55</b>	20	110	69,5	77	83	10	73	10	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,206	0,211	0,121	1,801
<b>Z56</b>	20	110	69,5	77	83	10	73	10	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,206	0,211	0,121	1,801
<b>Z57</b>	20	110	69,5	77	83	10	73	10	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,206	0,211	0,121	1,801
<b>Z58</b>	20	110	69,5	77	83	10	73	10	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,206	0,211	0,121	1,801
<b>Z59</b>	20	110	69,5	77	83	10	73	10	10	8	314	225,2	0,152	1,111	0,206	0,211	0,121	1,801
<b>Z60</b>	20	80	39,5	47	54	10	43	11	10	8	314	225,2	0,152	0,656	0,227	0,211	0,121	1,368
<b>Z61</b>	20	80	39,5	47	54	10	43	11	10	8	314	225,2	0,152	0,656	0,227	0,211	0,121	1,368
<b>Z62</b>	20	80	39,5	47	54	10	43	11	10	8	314	225,2	0,152	0,656	0,227	0,211	0,121	1,368

**Tabelle D.2.** *Elastische Nachgiebigkeit der Bauteile***Table D.2.** *Elastic resiliences of the components*

		$d_h$	$d_w$	$l_K$	$D_A$	$D_{A,Gr}$	$w$	$\tan \varphi_D$	$\beta_L$	$y$	$\varphi_D$	$\delta_P$
		[mm]	$d_2$ [mm]	[mm]	$D'_A$ [mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[°]	[mm/kN]
<b>Z01</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z02</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z03</b>	M16 × 100	18	30	69	51	60,9	1	0,448	2,30	1,70	24,1	3,029 E-4
<b>Z04</b>	M16 × 100	18	30	69	51	60,9	1	0,448	2,30	1,70	24,1	3,029 E-4
<b>Z05</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z06</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z07</b>	M16 × 100	18	30	69	51	60,9	1	0,448	2,30	1,70	24,1	3,029 E-4
<b>Z08</b>	M16 × 100	18	30	69	51	60,9	1	0,448	2,30	1,70	24,1	3,029 E-4
<b>Z09</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z10</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z11</b>	M16 × 100	18	30	69	51	60,9	1	0,448	2,30	1,70	24,1	3,029 E-4
<b>Z12</b>	M16 × 100	18	30	69	51	60,9	1	0,448	2,30	1,70	24,1	3,029 E-4
<b>Z13</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z14</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z15</b>	M16 × 100	18	30	69	51	60,9	1	0,448	2,30	1,70	24,1	3,029 E-4
<b>Z16</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z17</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z18</b>	M16 × 100	18	30	69	51	60,9	1	0,448	2,30	1,70	24,1	3,029 E-4
<b>Z19</b>	M16 × 100	18	30	70	51	61,4	1	0,448	2,33	1,70	24,1	3,054 E-4
<b>Z20</b>	M16 × 100	18	30	69	51	60,9	1	0,448	2,30	1,70	24,1	3,029 E-4
<b>Z21</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z22</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z23</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z24</b>	M16 × 100	18	30	69	51	60,9	1	0,448	2,30	1,70	24,1	3,029 E-4
<b>Z25</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z26</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z27</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z28</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z29</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z30</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z31</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z32</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z33</b>	M16 × 100	18	30	69	51	60,9	1	0,448	2,30	1,70	24,1	3,029 E-4
<b>Z34</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z35</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z36</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z37</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z38</b>	M16 × 90	18	30	60	51	56,4	1	0,443	1,98	1,70	23,9	2,788 E-4
<b>Z39</b>	M16 × 100	18	30	69	51	60,9	1	0,448	2,30	1,70	24,1	3,029 E-4

Fortsetzung

**Tabelle D.2.** fortgesetzt**Table D.2.** continued

		$d_h$	$d_w$	$l_K$	$D_A$	$D_{A,Gr}$	$w$	$\tan \varphi_D$	$\beta_L$	$y$	$\varphi_D$	$\delta_P$
			$d_2$		$D'_A$							
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[°]	[mm/kN]
<b>Z40</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z41</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z42</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z43</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z44</b>	M20 × 80	22	37	46	51	55,2	1	0,396	1,24	1,38	21,6	1,858 E-4
<b>Z45</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z46</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z47</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z48</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z49</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z50</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z51</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z52</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z53</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z54</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z55</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z56</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z57</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z58</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z59</b>	M20 × 110	22	37	75	51	67,9	1	0,412	2,03	1,38	22,4	2,668 E-4
<b>Z60</b>	M20 × 80	22	37	46	51	55,2	1	0,396	1,24	1,38	21,6	1,858 E-4
<b>Z61</b>	M20 × 80	22	37	46	51	55,2	1	0,396	1,24	1,38	21,6	1,858 E-4
<b>Z62</b>	M20 × 80	22	37	46	51	55,2	1	0,396	1,24	1,38	21,6	1,858 E-4

## D.2 Nachgiebigkeiten des DTI

**Tabelle D.3.** Ermittlung der Modellkennwerte – elastisch-plastisches Verhalten

**Table D.3.** Determination of the model parameters – elastic-plastic behavior

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$h_{\text{gap,ini}}$ [mm]	$h_{\text{flat,2.5}}$ [mm]	$F_{0.4}$ [kN]	$F_{0.4,\text{reg}}$ [kN]	$\Delta F_{0.4}$ [%]	$\Delta F_{0.4} / F_{p,C}$ [-]	$\delta_{\text{gap,pl}}$ [mm/kN]	$\delta_{\text{flat,pl}}$ [mm/kN]
<b>M16 – H8 – AND–A1</b>								
<b>D01</b>	1,12	-0,029	96,5	100,4	-3,9%	-0,04	-1,259 E-2	-1,256 E-4
<b>D02</b>	1,10	-0,028	95,5	99,4	-3,9%	-0,04	-1,263 E-2	-2,166 E-4
<b>D03</b>	1,11	-0,025	95,5	99,3	-3,8%	-0,04	-1,255 E-2	-1,984 E-4
<b>D04</b>	1,09	-0,034	94,2	98,5	-4,3%	-0,05	-1,266 E-2	-1,051 E-4
<b>D05</b>	1,09	-0,040	94,3	99,3	-5,0%	-0,06	-1,262 E-2	-1,256 E-4
<b>mean</b>	<b>1,10</b>	<b>-0,031</b>	<b>95,2</b>	<b>99,4</b>	<b>-4,2%</b>	<b>-0,05</b>	<b>-1,261 E-2</b>	<b>-1,543 E-4</b>
<b>V</b>	<b>0,9%</b>	<b>19,3%</b>	<b>1,0%</b>	<b>0,7%</b>			<b>0,3%</b>	<b>32,2%</b>
<b>M16 – H10 – TS–A10</b>								
<b>D06</b>	1,21	-0,027	98,7	104,5	-5,5%	-0,05	-1,218 E-2	-5,197 E-4
<b>D07</b>	1,18	-0,016	97,7	103,1	-5,2%	-0,05	-1,173 E-2	-5,181 E-4
<b>mean</b>	<b>1,20</b>	<b>-0,022</b>	<b>98,2</b>	<b>103,8</b>	<b>-5,4%</b>	<b>-0,05</b>	<b>-1,195 E-2</b>	<b>-5,189 E-4</b>
<b>V</b>	<b>1,6%</b>	<b>38,0%</b>	<b>0,7%</b>	<b>0,9%</b>	<b>3,3%</b>		<b>2,6%</b>	<b>0,2%</b>
<b>M16 – H10 – TS–A11</b>								
<b>D08</b>	1,58	-0,036	118,2	122,2	-3,3%	-0,04	-1,384 E-2	-1,195 E-4
<b>D09</b>	1,64	-0,025	120,2	123,7	-2,8%	-0,03	-1,370 E-2	-2,924 E-4
<b>D10</b>	1,50	-0,031	114,2	118,6	-3,7%	-0,04	-1,315 E-2	-2,105 E-4
<b>D11</b>	1,60	-0,025	117,6	121,6	-3,3%	-0,04	-1,439 E-2	-3,121 E-4
<b>D12</b>	1,57	-0,033	116,5	120,4	-3,2%	-0,04	-1,396 E-2	-2,151 E-4
<b>mean</b>	<b>1,58</b>	<b>-0,030</b>	<b>117,3</b>	<b>121,3</b>	<b>-3,3%</b>	<b>-0,04</b>	<b>-1,381 E-2</b>	<b>-2,299 E-4</b>
<b>V</b>	<b>3,2%</b>	<b>16,4%</b>	<b>1,9%</b>	<b>1,6%</b>			<b>3,3%</b>	<b>33,3%</b>
<b>M20 – H8 – AND–A2</b>								
<b>D13</b>	1,38	-0,029	144,2	148,0	-2,6%	-0,03	-1,038 E-2	-1,646 E-4
<b>D14</b>	1,39	-0,012	146,5	148,5	-1,4%	-0,01	-1,056 E-2	-2,562 E-4
<b>D15</b>	1,33	-0,039	145,4	150,4	-3,3%	-0,04	-1,021 E-2	-2,333 E-4
<b>D16</b>	1,36	-0,002	147,8	150,0	-1,5%	-0,02	-1,039 E-2	-3,791 E-4
<b>D17</b>	1,43	-0,021	146,7	149,7	-2,0%	-0,02	-1,136 E-2	-2,385 E-4
<b>mean</b>	<b>1,38</b>	<b>-0,020</b>	<b>146,1</b>	<b>149,3</b>	<b>-2,1%</b>	<b>-0,02</b>	<b>-1,058 E-2</b>	<b>-2,543 E-4</b>
<b>V</b>	<b>2,7%</b>	<b>70,3%</b>	<b>0,9%</b>	<b>0,7%</b>			<b>4,3%</b>	<b>30,7%</b>
<b>M20 – H10 – TS–22AA</b>								
<b>D18</b>	1,29	-0,043	190,9	198,5	-3,8%	-0,04	-7,331 E-3	-1,010 E-4
<b>D19</b>	1,30	-0,054	189,6	198,4	-4,4%	-0,05	-7,461 E-3	-8,968 E-5
<b>D20</b>	1,29	-0,058	190,8	200,2	-4,7%	-0,05	-7,354 E-3	-1,082 E-4
<b>D21</b>	1,30	-0,053	189,0	198,6	-4,8%	-0,06	-7,552 E-3	-1,746 E-4
<b>D22</b>	1,27	-0,042	186,2	194,1	-4,1%	-0,05	-7,312 E-3	-1,235 E-4
<b>mean</b>	<b>1,29</b>	<b>-0,050</b>	<b>189,3</b>	<b>197,9</b>	<b>-4,4%</b>	<b>-0,05</b>	<b>-7,402 E-3</b>	<b>-1,194 E-4</b>
<b>V</b>	<b>0,9%</b>	<b>13,5%</b>	<b>1,0%</b>	<b>1,1%</b>			<b>1,4%</b>	<b>27,8%</b>

**Tabelle D.4.** Ermittlung der Modellkennwerte – elastisches Verhalten**Table D.4.** Determination of the model parameters – elastic behavior

1	2	3	4	5	6	7	8
	0,25 $F_{p,C}$	0,5 $F_{p,C}$	0,75 $F_{p,C}$	1,0 $F_{p,C}$	1,25 $F_{p,C}$	1,5 $F_{p,C}$	
	$\delta_{\text{gap,el } 0.25}$	$\delta_{\text{gap,el } 0.5}$	$\delta_{\text{gap,el } 0.75}$	$\delta_{\text{gap,el } 1.0}$	$\delta_{\text{gap,el } 1.25}$	$\delta_{\text{gap,el } 1.5}$	$\delta_{\text{flat,nom}}$
	[mm/kN]	[mm/kN]	[mm/kN]	[mm/kN]	[mm/kN]	[mm/kN]	[mm/kN]
<b>M16 – H8 – AND-A1</b>							
<b>D04</b>	-1,474 E-3	-8,391 E-4	-6,174 E-4	-4,890 E-4	-3,672 E-4	-2,692 E-4	
<b>D05</b>	-1,523 E-3	-8,028 E-4	-6,379 E-4	-4,853 E-4	-3,513 E-4	-2,705 E-4	
<b>mean</b>	<b>-1,499 E-3</b>	<b>-8,209 E-4</b>	<b>-6,276 E-4</b>	<b>-4,872 E-4</b>	<b>-3,593 E-4</b>	<b>-2,698 E-4</b>	-1,867 E-5
<b>V</b>	2,4%	3,1%	2,3%	0,5%	3,1%	0,3%	
<b>M16 – H10 – TS-A11</b>							
<b>D11</b>	-1,353 E-3	-7,872 E-4	-4,800 E-4	-3,505 E-4	-2,739 E-4	-1,769 E-4	
<b>D12</b>	-1,258 E-3	-7,501 E-4	-4,933 E-4	-3,355 E-4	-2,558 E-4	-1,920 E-4	
<b>mean</b>	<b>-1,305 E-3</b>	<b>-7,687 E-4</b>	<b>-4,866 E-4</b>	<b>-3,430 E-4</b>	<b>-2,649 E-4</b>	<b>-1,845 E-4</b>	-1,860 E-5
<b>V</b>	5,1%	3,4%	1,9%	3,1%	4,8%	5,8%	
<b>M20 – H8 – AND-A2</b>							
<b>D16</b>	-1,224 E-3	-6,607 E-4	-4,332 E-4	-3,089 E-4	-2,319 E-4	-1,722 E-4	
<b>D17</b>	-1,068 E-3	-5,801 E-4	-4,137 E-4	-3,060 E-4	-2,259 E-4	-1,720 E-4	
<b>mean</b>	<b>-1,146 E-3</b>	<b>-6,204 E-4</b>	<b>-4,235 E-4</b>	<b>-3,075 E-4</b>	<b>-2,289 E-4</b>	<b>-1,721 E-4</b>	-1,875 E-5
<b>V</b>	9,7%	9,2%	3,3%	0,6%	1,8%	0,1%	
<b>M20 – H10 – TS-22AA</b>							
<b>D21</b>	-9,457 E-4	-5,553 E-4	-3,890 E-4	-2,836 E-4	-2,204 E-4	-1,638 E-4	
<b>D22</b>	-9,120 E-4	-5,762 E-4	-4,276 E-4	-2,836 E-4	-2,197 E-4	-1,621 E-4	
<b>mean</b>	<b>-9,288 E-4</b>	<b>-5,657 E-4</b>	<b>-4,083 E-4</b>	<b>-2,836 E-4</b>	<b>-2,200 E-4</b>	<b>-1,630 E-4</b>	-1,522 E-5
<b>V</b>	2,6%	2,6%	6,7%	0,0%	0,2%	0,8%	



## D.3 Krafteinleitungsfaktoren

**Tabelle D.5.** Krafteinleitungsfaktoren für Bauteil-Zugversuche nach VDI 2230-1

**Table D.5.** Load introduction factors for component tensile tests according to VDI 2230-1

										VDI 2230-1			
										Tab. 2	Gl. 76		
		$D_A$	$d_2$	$h$	$a_k$	$l_A$	$a_k/h$	$l_A/h$	Typ	$n^a$	$n^b$	$\Sigma f_v$	$\Sigma f_{vk}$
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]		[-]	[-]	[mm]	[mm]
<b>Z01</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z02</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z03</b>	M16 × 100	51	30	69	10,5	0	0,15	0	SV 1	0,48	0,31	3,2	1
<b>Z04</b>	M16 × 100	51	30	69	10,5	0	0,15	0	SV 1	0,48	0,31	3,2	1
<b>Z05</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z06</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z07</b>	M16 × 100	51	30	69	10,5	0	0,15	0	SV 1	0,48	0,31	3,2	1
<b>Z08</b>	M16 × 100	51	30	69	10,5	0	0,15	0	SV 1	0,48	0,31	3,2	1
<b>Z09</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z10</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z11</b>	M16 × 100	51	30	69	10,5	0	0,15	0	SV 1	0,48	0,31	3,2	1
<b>Z12</b>	M16 × 100	51	30	69	10,5	0	0,15	0	SV 1	0,48	0,31	3,2	1
<b>Z13</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z14</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z15</b>	M16 × 100	51	30	69	10,5	0	0,15	0	SV 1	0,48	0,31	3,2	1
<b>Z16</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z17</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z18</b>	M16 × 100	51	30	69	10,5	0	0,15	0	SV 1	0,48	0,31	3,2	1
<b>Z19</b>	M16 × 100	51	30	70	10,5	0	0,15	0	SV 4	0,32	0,26	3,9	1
<b>Z20</b>	M16 × 100	51	30	69	10,5	0	0,15	0	SV 1	0,48	0,31	3,2	1
<b>Z21</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z22</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z23</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z24</b>	M16 × 100	51	30	69	10,5	0	0,15	0	SV 1	0,48	0,31	3,2	1
<b>Z25</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z26</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z27</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z28</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z29</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z30</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z31</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1

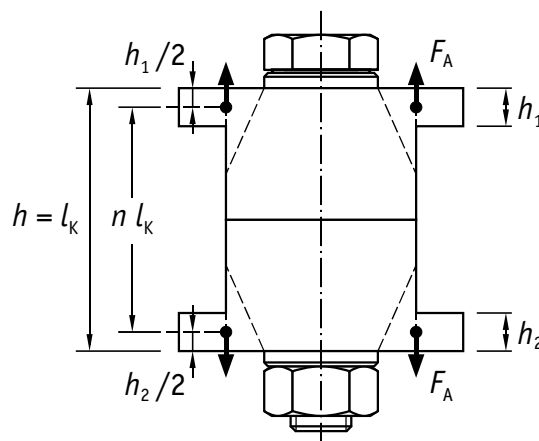
Fortsetzung

**Tabelle D.5.** fortgesetzt**Table D.5.** continued

										VDI 2230-1			
										Tab. 2		Gl. 76	
		$D_A$	$d_2$	$h$	$a_k$	$l_A$	$a_k/h$	$l_A/h$	Typ	$n^a$	$n^b$	$\Sigma f_V$	$\Sigma f_{VK}$
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]		[-]	[-]	[mm]	[mm]
<b>Z32</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z33</b>	M16 × 100	51	30	69	10,5	0	0,15	0	SV 1	0,48	0,31	3,2	1
<b>Z34</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z35</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z36</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z37</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z38</b>	M16 × 90	51	30	60	10,5	0	0,18	0	SV 1	0,45	0,25	4,0	1
<b>Z39</b>	M16 × 100	51	30	69	10,5	0	0,15	0	SV 1	0,48	0,31	3,2	1
<b>Z40</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z41</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z42</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z43</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z44</b>	M20 × 80	51	37	46	7	0	0,15	0	SV 1	0,48	0,29	3,4	1
<b>Z45</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z46</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z47</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z48</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z49</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z50</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z51</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z52</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z53</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z54</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z55</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z56</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z57</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z58</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z59</b>	M20 × 110	51	37	75	7	0	0,09	0	SV 1	0,56	0,48	2,1	1
<b>Z60</b>	M20 × 80	51	37	46	7	0	0,15	0	SV 1	0,48	0,29	3,4	1
<b>Z61</b>	M20 × 80	51	37	46	7	0	0,15	0	SV 1	0,48	0,29	3,4	1
<b>Z62</b>	M20 × 80	51	37	46	7	0	0,15	0	SV 1	0,48	0,29	3,4	1

<sup>a</sup> vereinfachte Ermittlung aus Verbindungstypen nach VDI 2230-1, Bild 22 und Tabelle 2, siehe Bild 5.9 (b)

<sup>b</sup> Ermittlung aus Verformungen nach VDI 2230-1, Gl. 76 bzw. Gleichung (5.26) unter Verwendung eines einfachen Finite-Elemente-Modells



**Bild D.1.** Vereinfachte Abschätzung des Krafteinleitungsortes

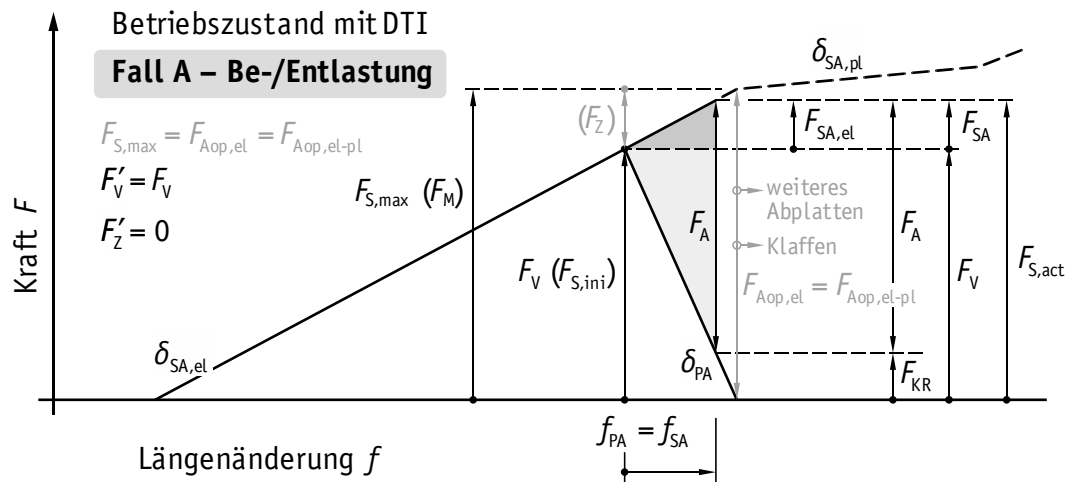
**Figure D.1.** Simplified estimation of the load introduction point

**Tabelle D.6.** Vereinfachte Abschätzung der Krafteinleitungsfaktoren für Bauteil-Zugversuche

**Table D.6.** Simplified estimation of the load introduction factors for the component tensile tests

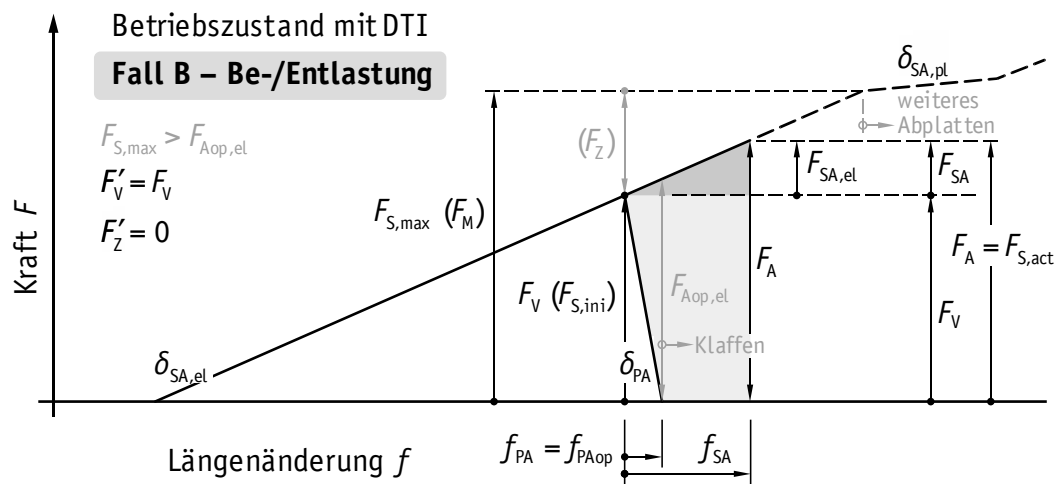
	$l_k$ [mm]	$h_1$ [mm]	$h_2$ [mm]	Typ	$n$ [–]
<b>M16 × 90</b>	60	10	10	SV 1	<b>0,83</b>
<b>M16 × 100</b>	69	10	10	SV 1	<b>0,86</b>
<b>M16 × 100</b>	70	35	10	SV 4	<b>0,68</b>
<b>M20 × 80</b>	46	10	10	SV 1	<b>0,78</b>
<b>M20 × 110</b>	75	10	10	SV 1	<b>0,87</b>

## D.4 Verspannungsschaubilder für Betriebszustände mit DTI



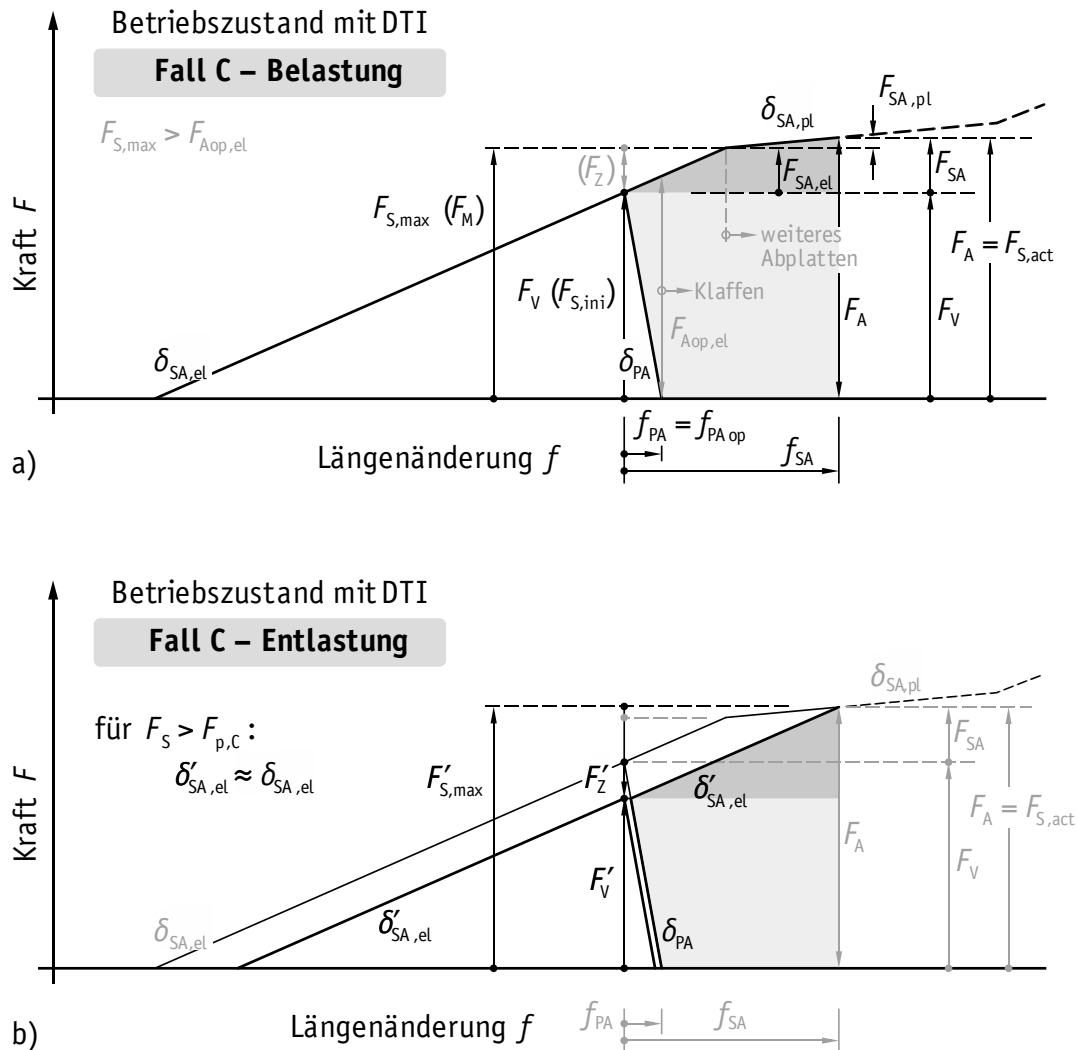
**Bild D.2.** Verspannungsschaubild für den Betriebszustand im Fall A: kein Klaffen, kein weiteres Abplatten und kein Vorspannkraftverlust,  $F_{S,max} = F_{Aop,el} = F_{Aop,el-pl}$

**Figure D.2.** Joint diagram in the working state in case A: no opening, no additional flattening and no loss of preload,  $F_{S,max} = F_{Aop,el} = F_{Aop,el-pl}$



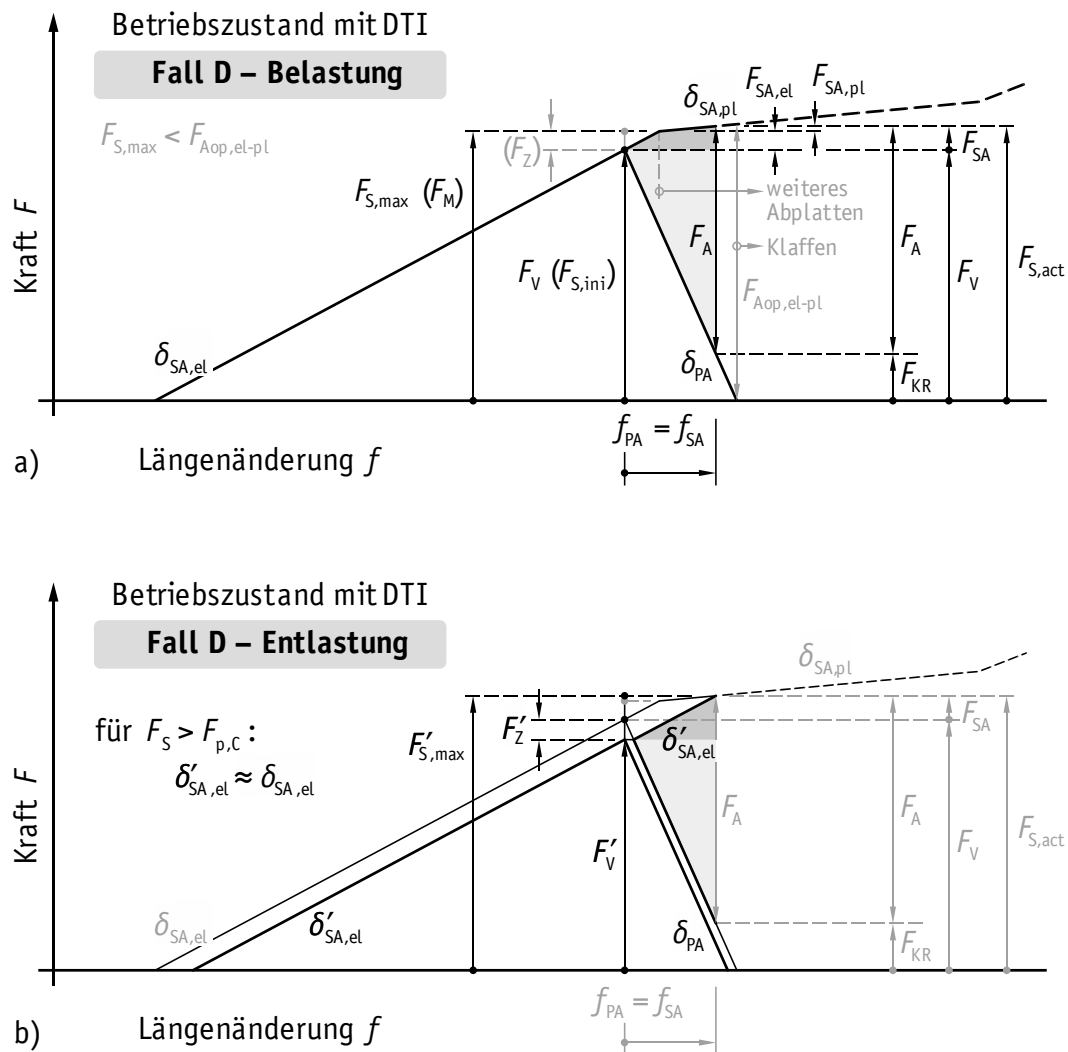
**Bild D.3.** Verspannungsschaubild für den Betriebszustand im Fall B: mit Klaffen, kein weiteres Abplatten und kein Vorspannkraftverlust

**Figure D.3.** Joint diagram in the working state in case B: with opening, no additional flattening and no loss of preload



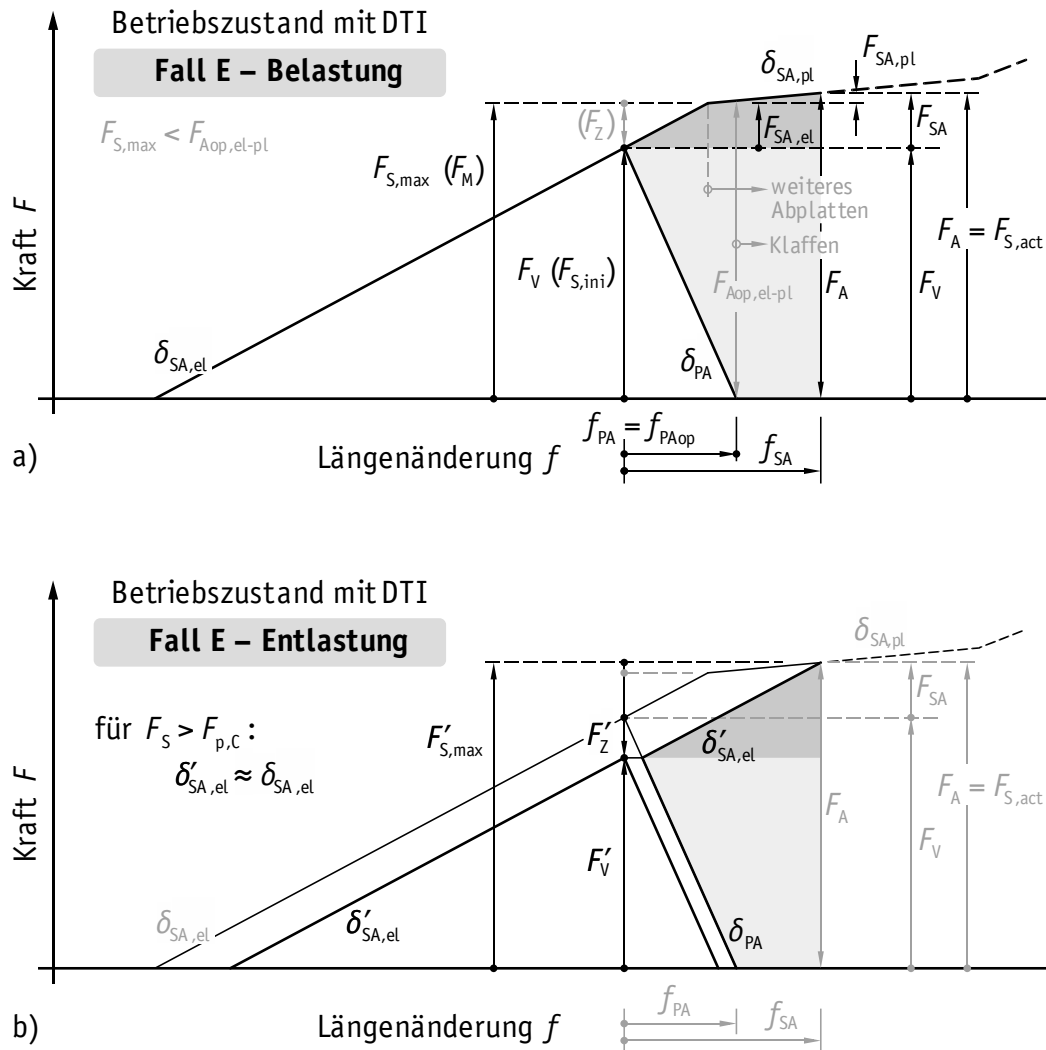
**Bild D.4.** Verspannungsschaubild für den Betriebszustand im Fall C: (a) Belastung mit Klaffen und weiterem Abplatten, (b) Entlastung mit Vorspannkraftverlust

**Figure D.4.** Joint diagram in the working state in case C: (a) loading with opening and additional flattening, (b) unloading with loss of preload



**Bild D.5.** Verspannungsschaubild für den Betriebszustand im Fall D: (a) Belastung mit weiterem Abplatten und ohne Klaffen, (b) Entlastung mit Vorspannkraftverlust

**Figure D.5.** Joint diagram in the working state in case D: (a) loading with additional flattening and no opening, (b) unloading with loss of preload



**Bild D.6.** Verspannungsschaubild für den Betriebszustand im Fall E: (a) Belastung mit weiterem Abplatten und mit Klaffen, (b) Entlastung mit Vorspannkraftverlust (identisch mit Bild 5.14)

**Figure D.6.** Joint diagram in the working state in case E: (a) loading with additional flattening and opening, (b) unloading with loss of preload (identical with Figure 5.14)

## D.5 Grenzen der Fallunterscheidung für Schraubenzusatzkräfte und Verformungen

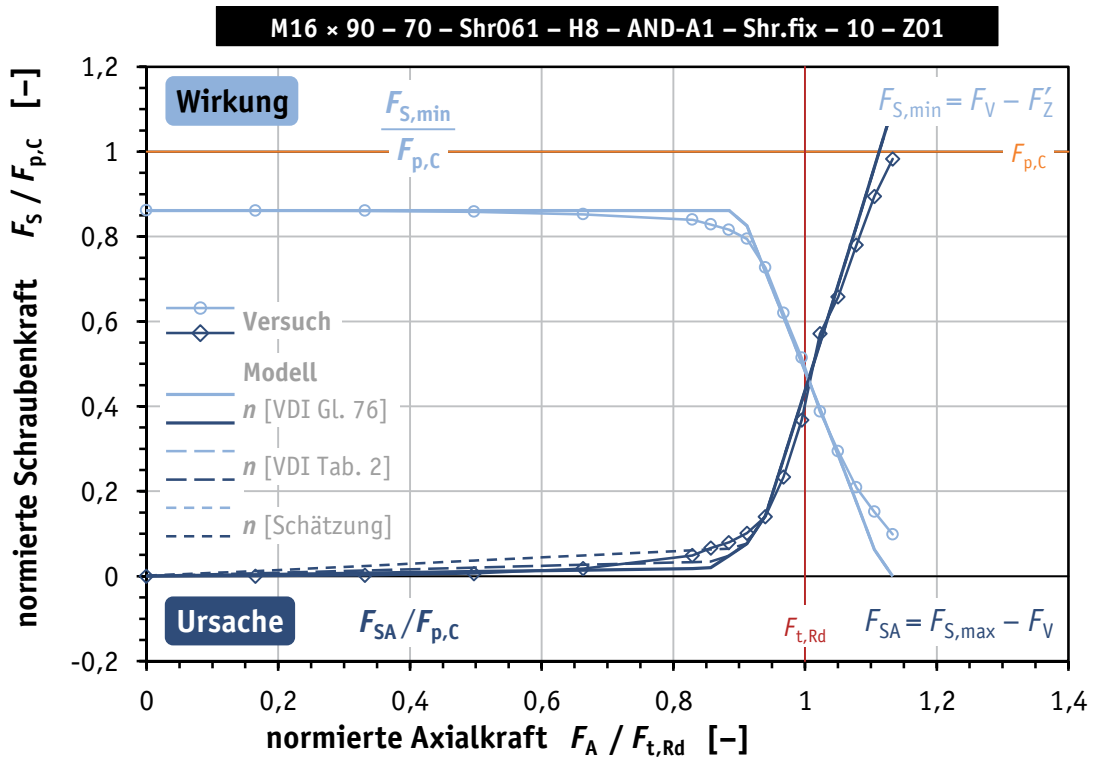
**Tabelle D.7.** Grenzen der Fallunterscheidung für axiale Schraubenzusatzkräfte und zugehörige Verformungen entsprechend Tabelle 5.10

**Table D.7.** Limits of the distinction of cases for axial additional bolt loads and associated deformations according to Table 5.10

Abgrenzung der Abschnitte		Axiale Schraubenzusatzkraft $F_{SA}$	Fall
Vorbelastung	Abhebegrenze	Verlängerung $f_{SA}$ mit DTI	
$\boxed{F_A} < \frac{F_{S,max} - F_V}{\Phi_{el}}$	$\boxed{F_A} = F_{Aop,el} \leq F_{S,max}$	$F_{SA} = F_V \cdot \frac{\delta_{PA}}{\delta_{SA,el}}$ $f_{SA} = F_V \cdot \delta_{PA}$	A B
	$\boxed{F_A} < F_{Aop,el-pl} < F_{Aop,el}$		A D
$\boxed{F_A} = \frac{F_{S,max} - F_V}{\Phi_{el}}$	$F_{Aop,el} = \boxed{F_A} = F_{S,max}$	$F_{SA} = F_{S,max} - F_V$ $f_{SA} = (F_{S,max} - F_V) \cdot \delta_{SA,el}$	A E
	$F_{Aop,el} < \boxed{F_A} = F_{S,max}$		B C
$\frac{F_{S,max} - F_V}{\Phi_{el}} < \boxed{F_A}$	$F_{Aop,el-pl} = \boxed{F_A} < F_{Aop,el}$	$F_{SA} = F_V \cdot \frac{\delta_{PA}}{\delta_{SA,pl}} + (F_{S,max} - F_V) \cdot \left(1 - \frac{\delta_{SA,el}}{\delta_{SA,pl}}\right)$ $f_{SA} = F_V \cdot \delta_{PA}$	D E
	$F_{Aop,pl} = \boxed{F_A} < F_{Aop,el}$	$F_{SA} = F_V \cdot \frac{\delta_{PA}}{\delta_{SA,pl}}$ $f_{SA} = F_V \cdot \delta_{PA}$	D E
$F_{S,max} - F_V = 0 < \boxed{F_A}$			
	$F_{Aop,pl} = \boxed{F_A} = F_{Aop,el}$	$F_{SA} = F_V \cdot \frac{\delta_{PA}}{\delta_{SA,el}}$ $f_{SA} = F_V \cdot \delta_{PA}$	A B

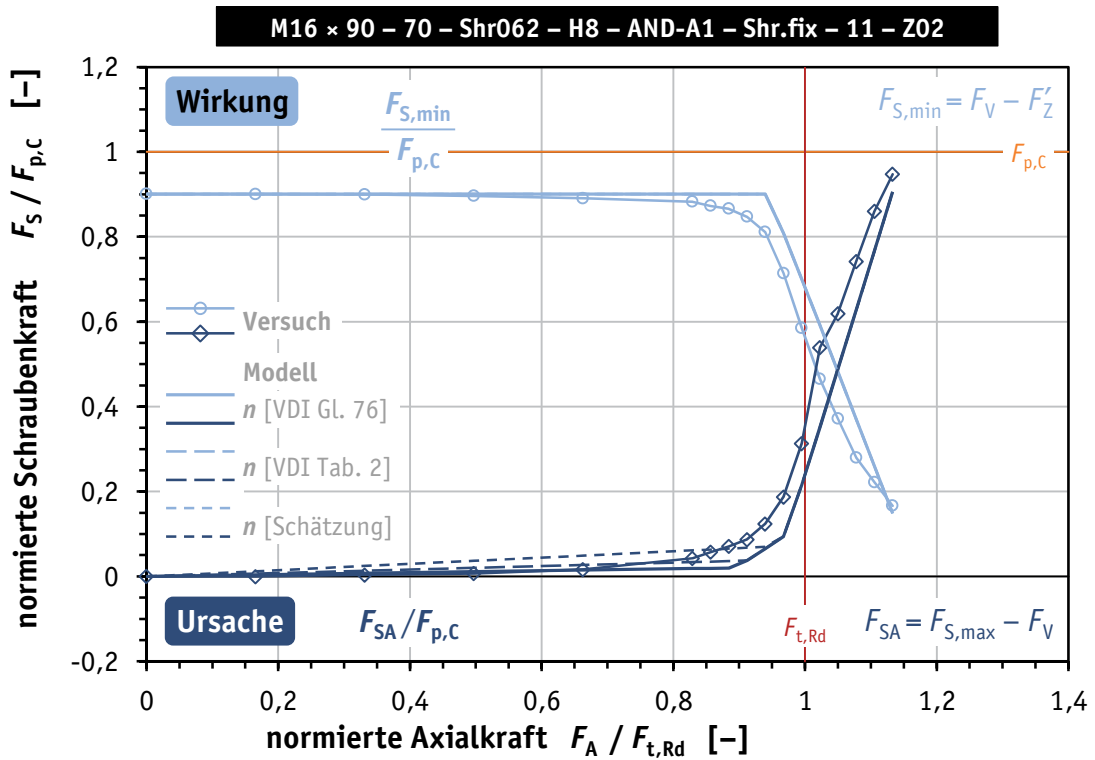


## D.6 Vergleich von Versuch und Modell – individuelle Prüfungen



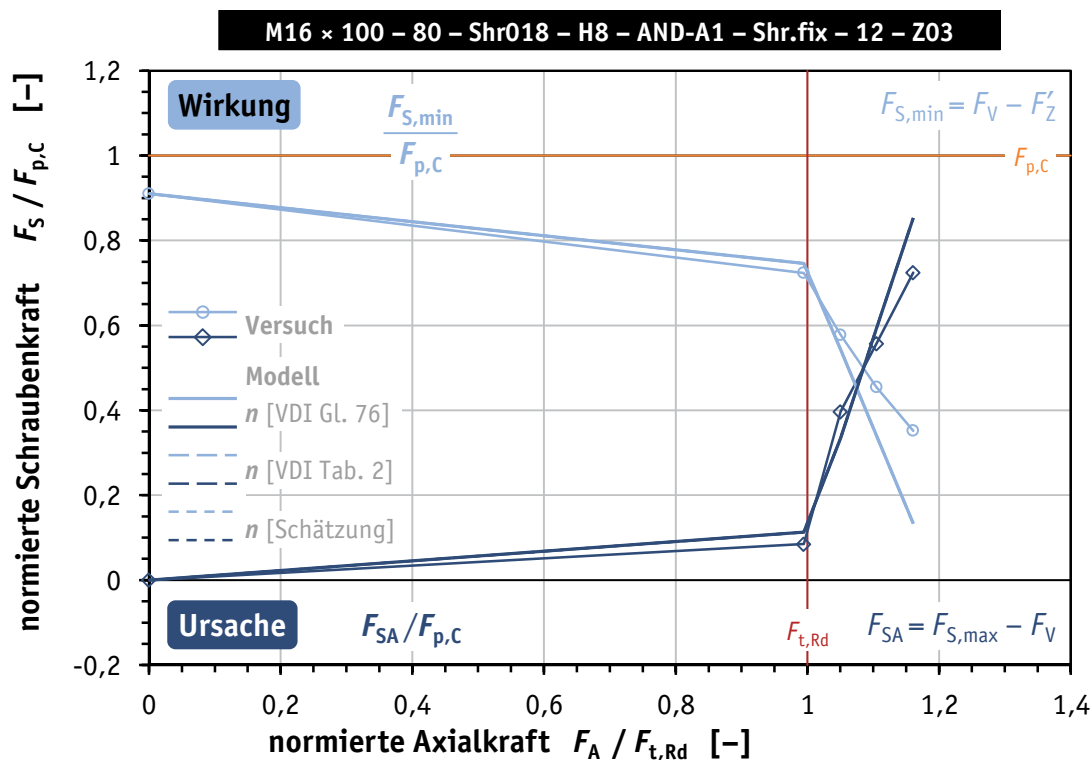
**Bild D.7.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z01 (mit DTI)

**Figure D.7.** Comparison test/model: component tensile test No. Z01 (including DTI)



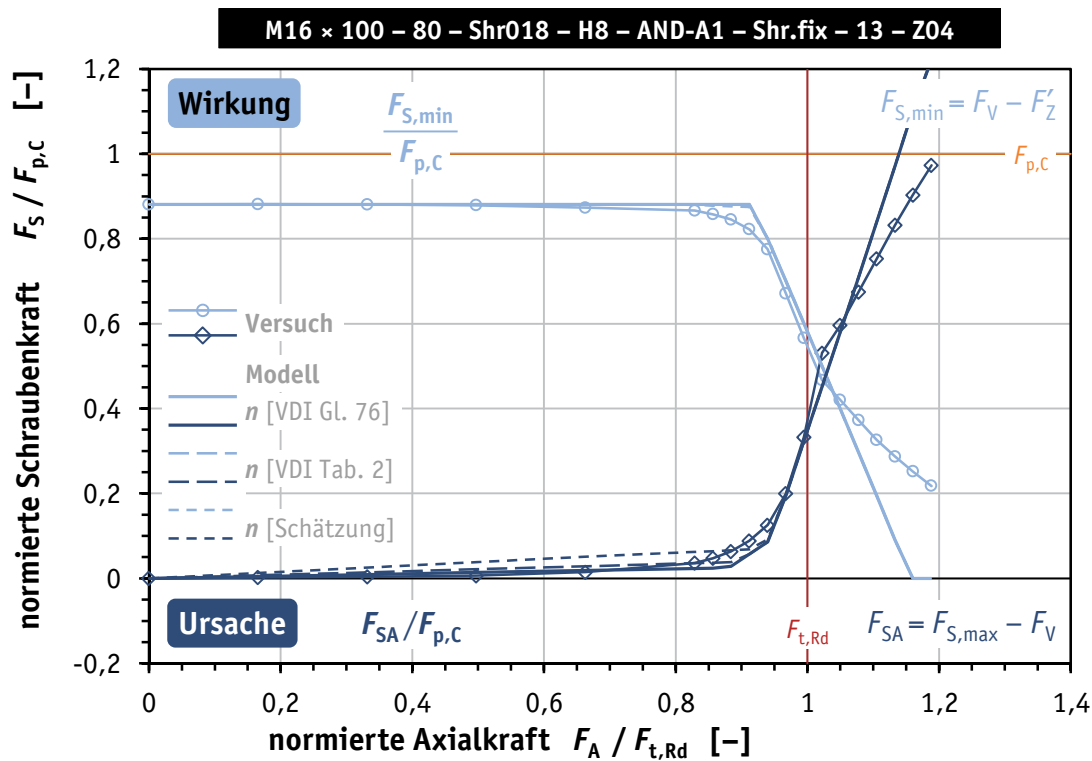
**Bild D.8.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z02 (mit DTI)

**Figure D.8.** Comparison test/model: component tensile test No. Z02 (including DTI)



**Bild D.9.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z03 (mit DTI)

**Figure D.9.** Comparison test/model: component tensile test No. Z03 (including DTI)



**Bild D.10.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z04 (mit DTI)

**Figure D.10.** Comparison test/model: component tensile test No. Z04 (including DTI)

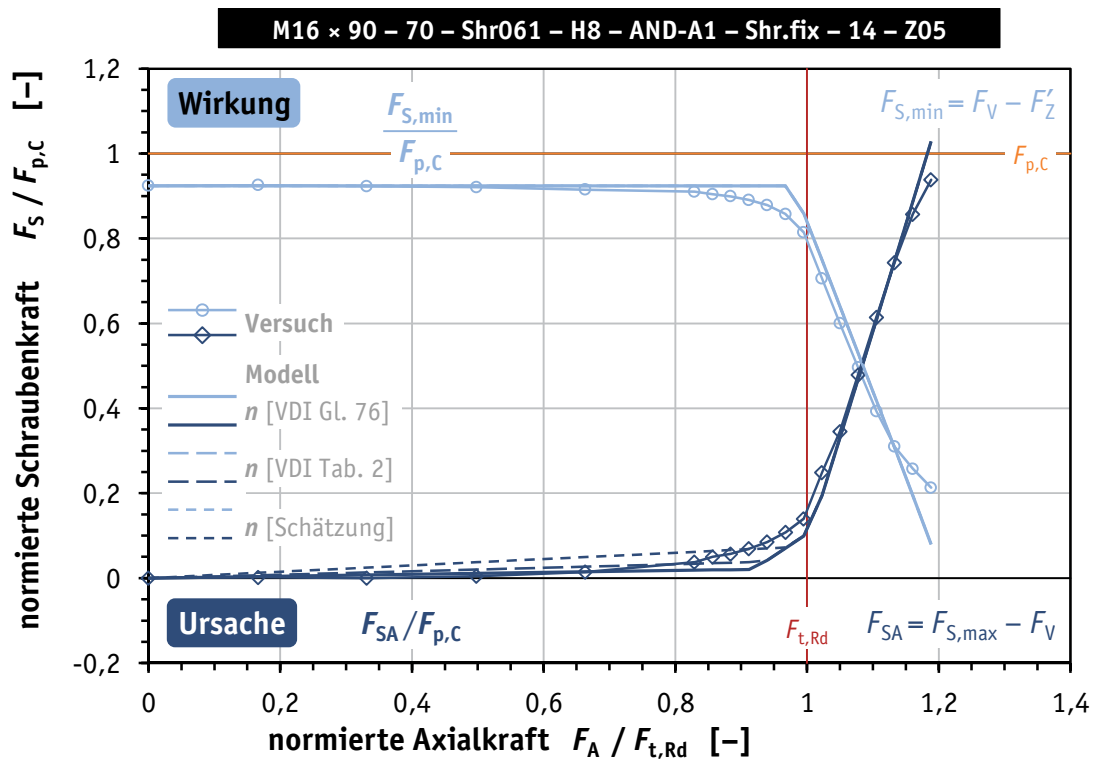


Bild D.11. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z05 (mit DTI)

Figure D.11. Comparison test/model: component tensile test No. Z05 (including DTI)

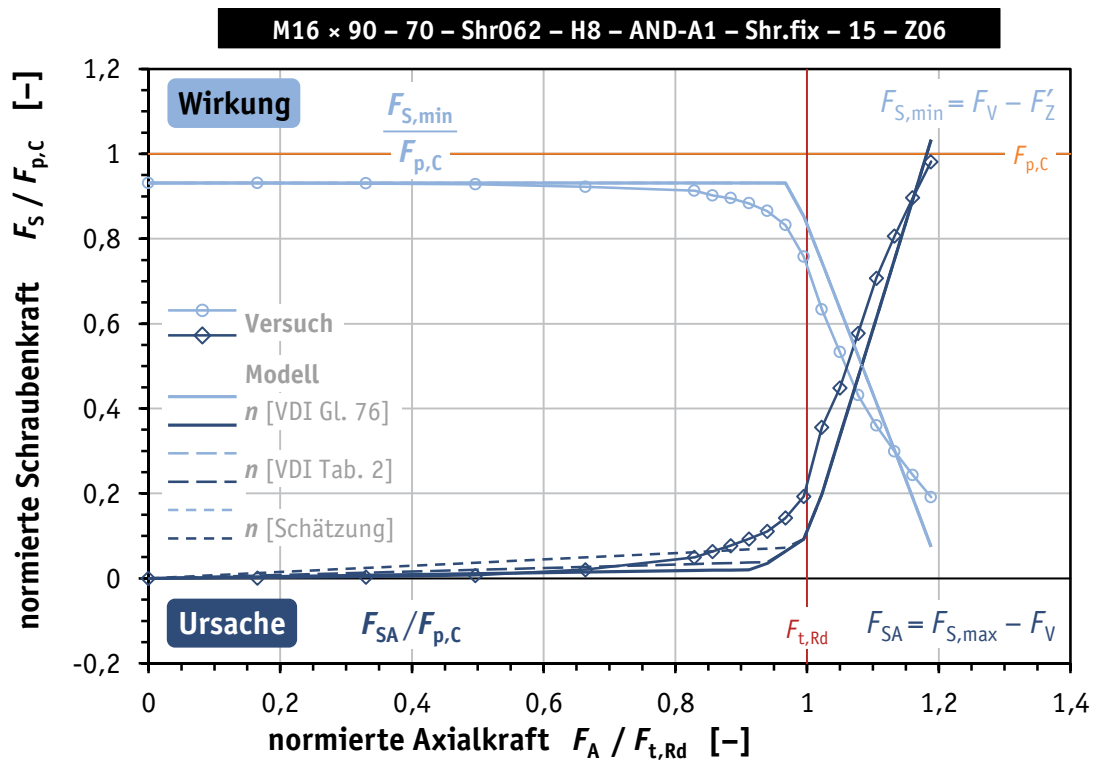
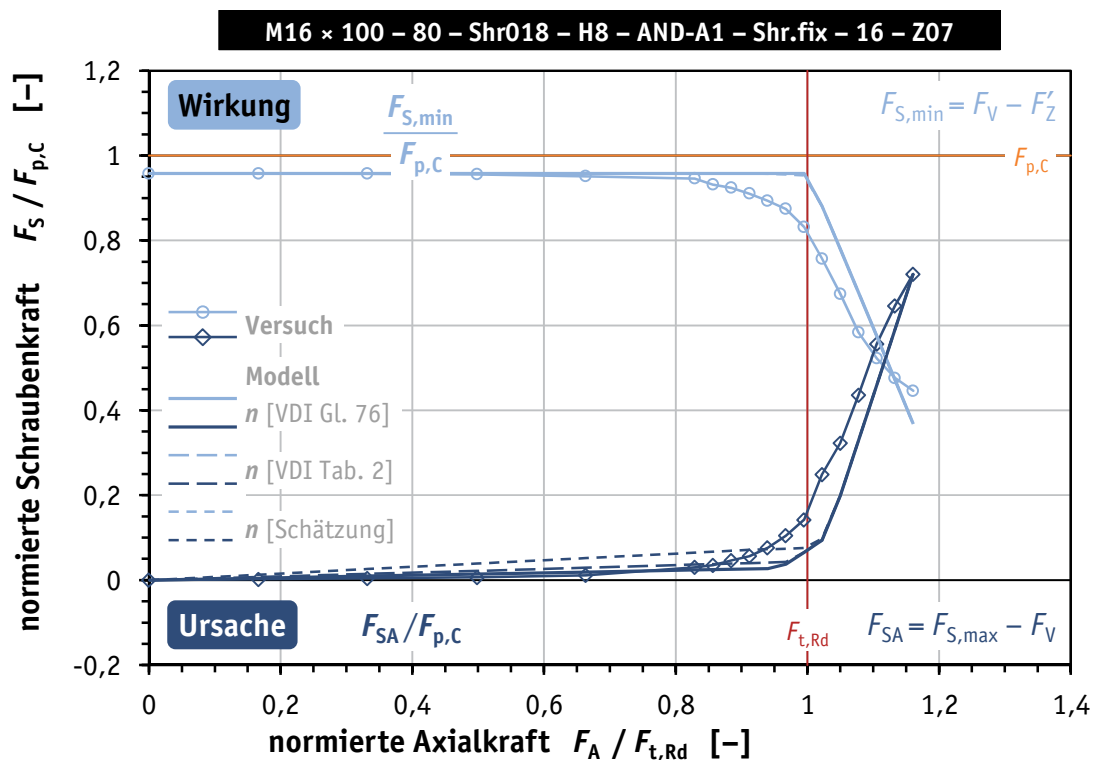


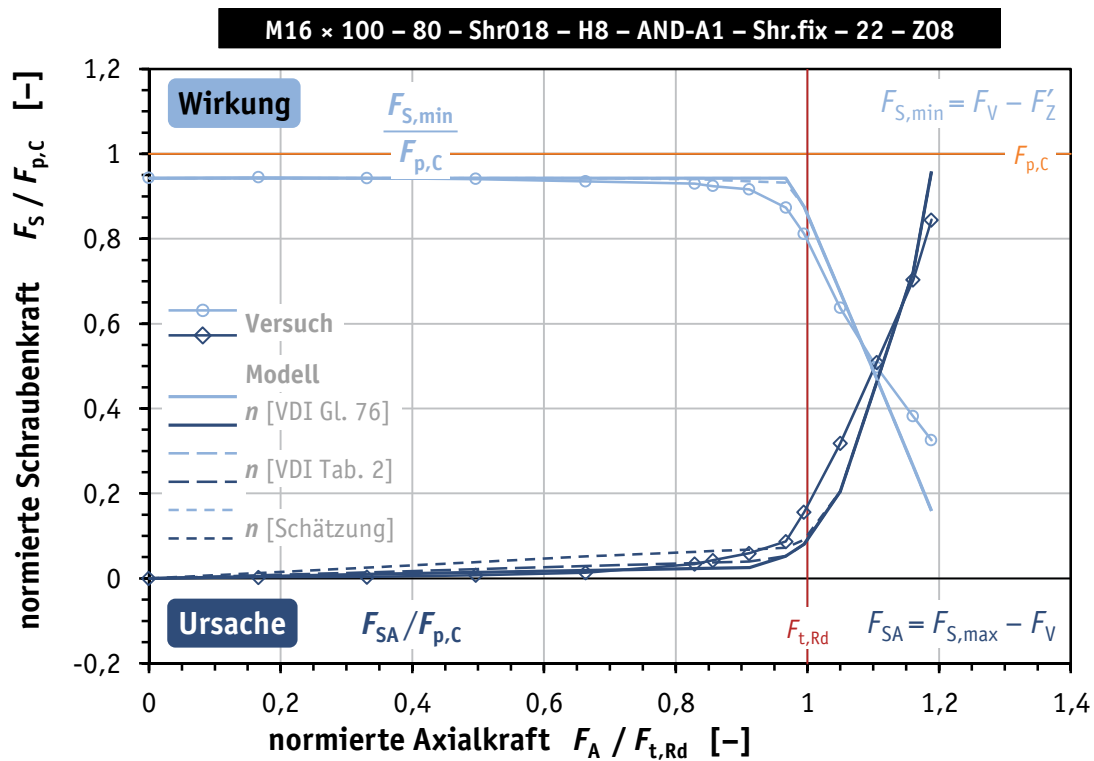
Bild D.12. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z06 (mit DTI)

Figure D.12. Comparison test/model: component tensile test No. Z06 (including DTI)



**Bild D.13.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z07 (mit DTI)

**Figure D.13.** Comparison test/model: component tensile test No. Z07 (including DTI)



**Bild D.14.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z08 (mit DTI)

**Figure D.14.** Comparison test/model: component tensile test No. Z08 (including DTI)

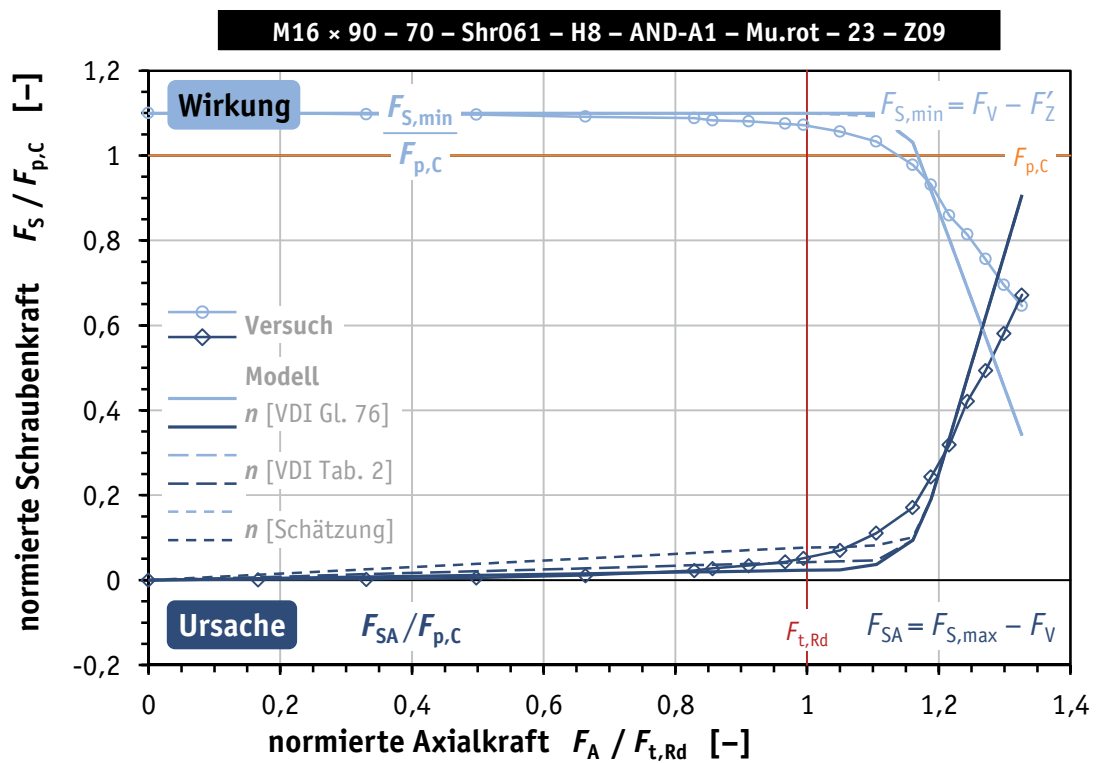


Bild D.15. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z09 (mit DTI)

Figure D.15. Comparison test/model: component tensile test No. Z09 (including DTI)

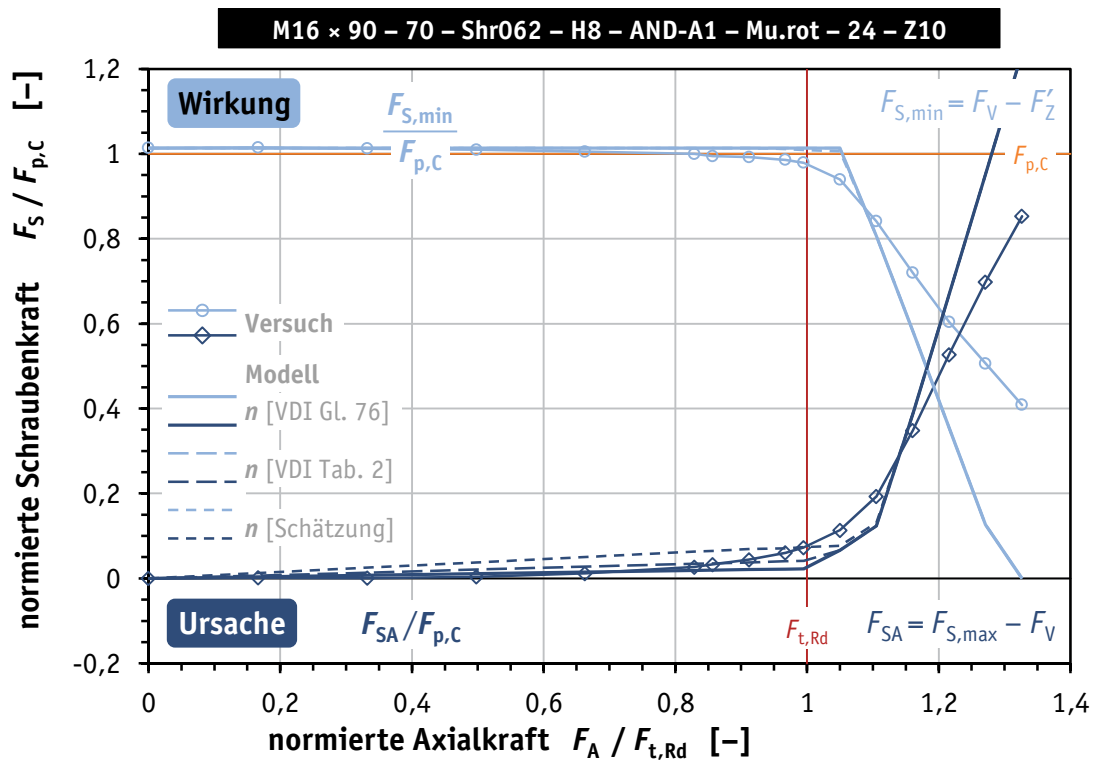
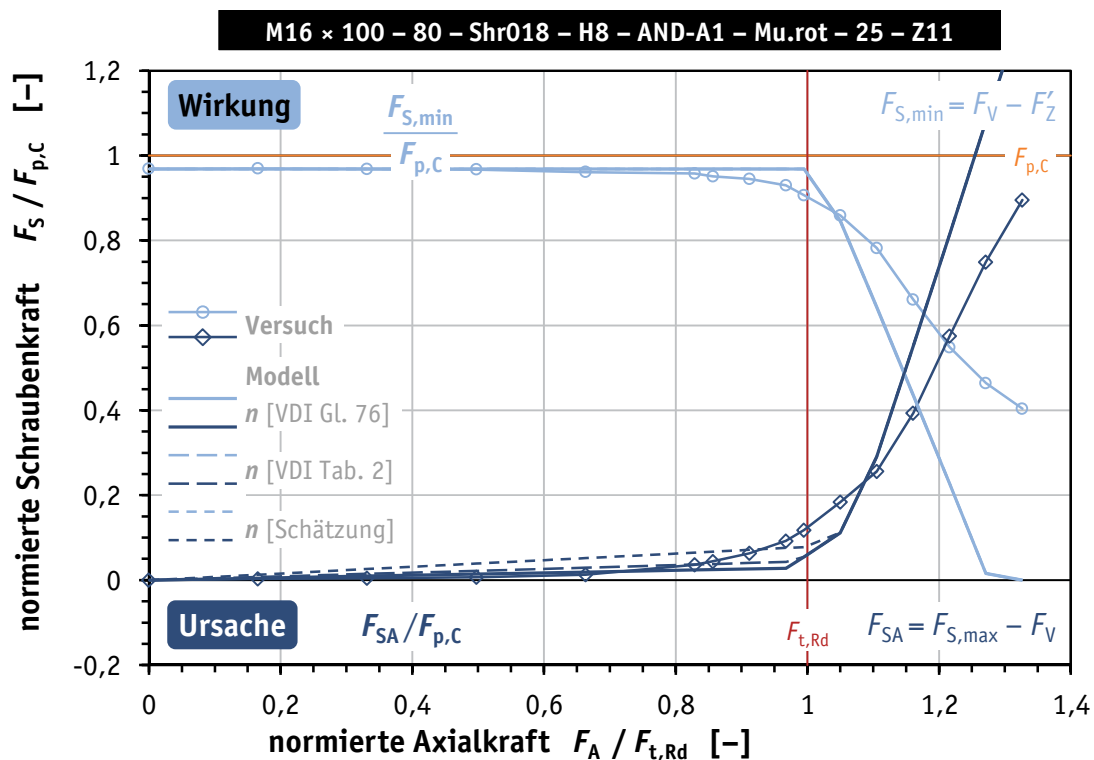


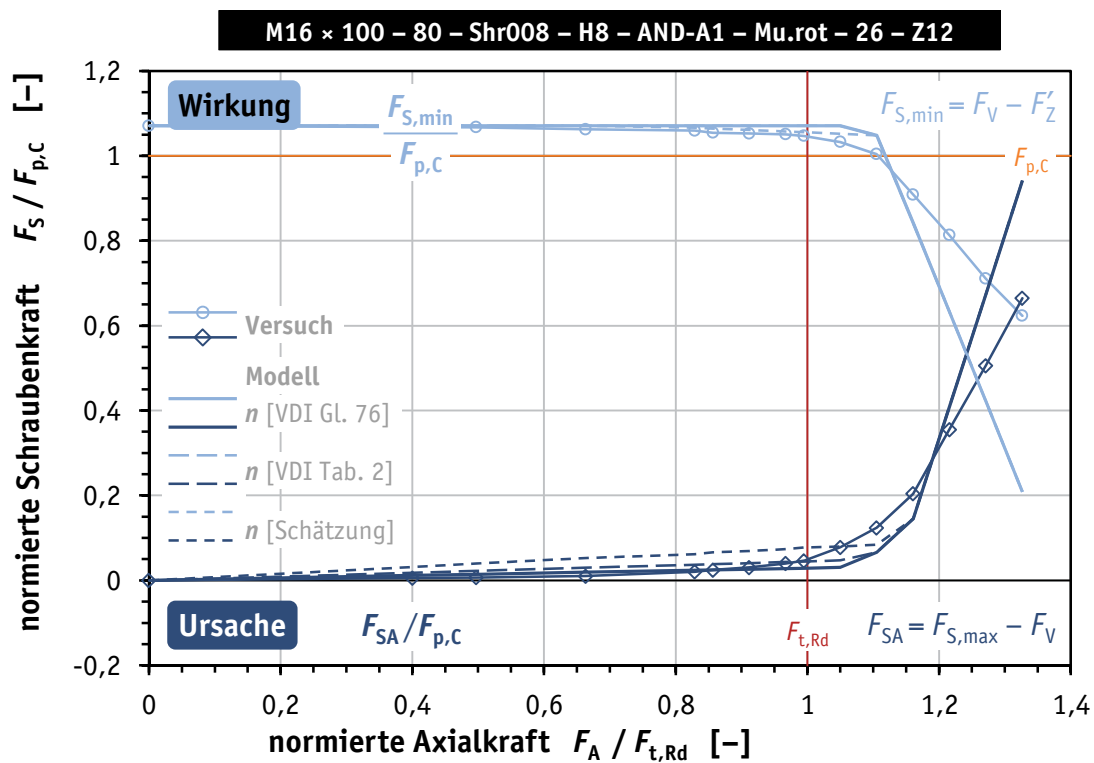
Bild D.16. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z10 (mit DTI)

Figure D.16. Comparison test/model: component tensile test No. Z10 (including DTI)



**Bild D.17.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z11 (mit DTI)

**Figure D.17.** Comparison test/model: component tensile test No. Z11 (including DTI)



**Bild D.18.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z12 (mit DTI)

**Figure D.18.** Comparison test/model: component tensile test No. Z12 (including DTI)

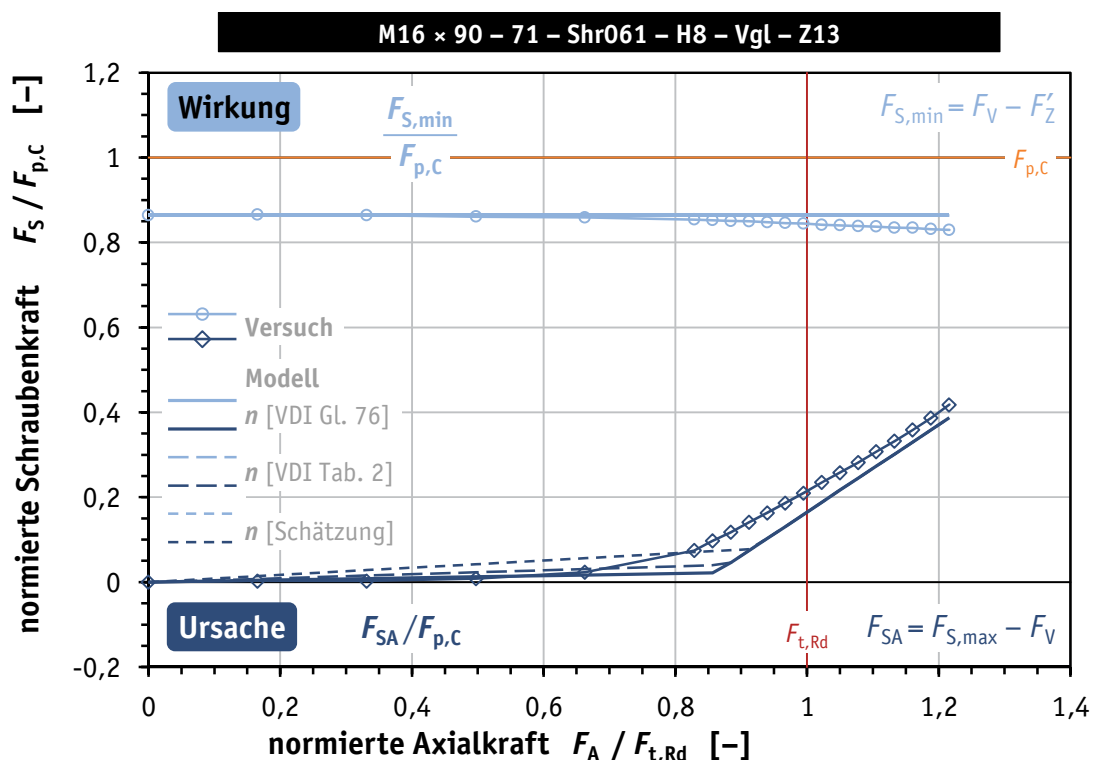


Bild D.19. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z13 (ohne DTI)

Figure D.19. Comparison test/model: component tensile test No. Z13 (without DTI)

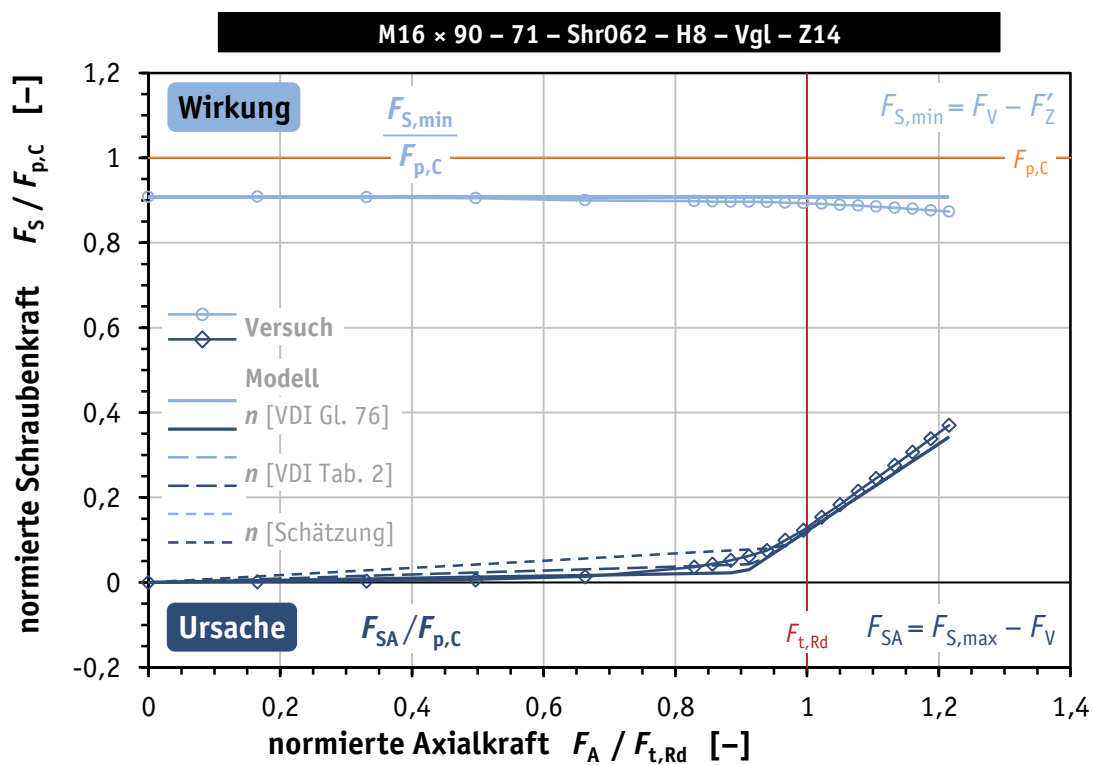
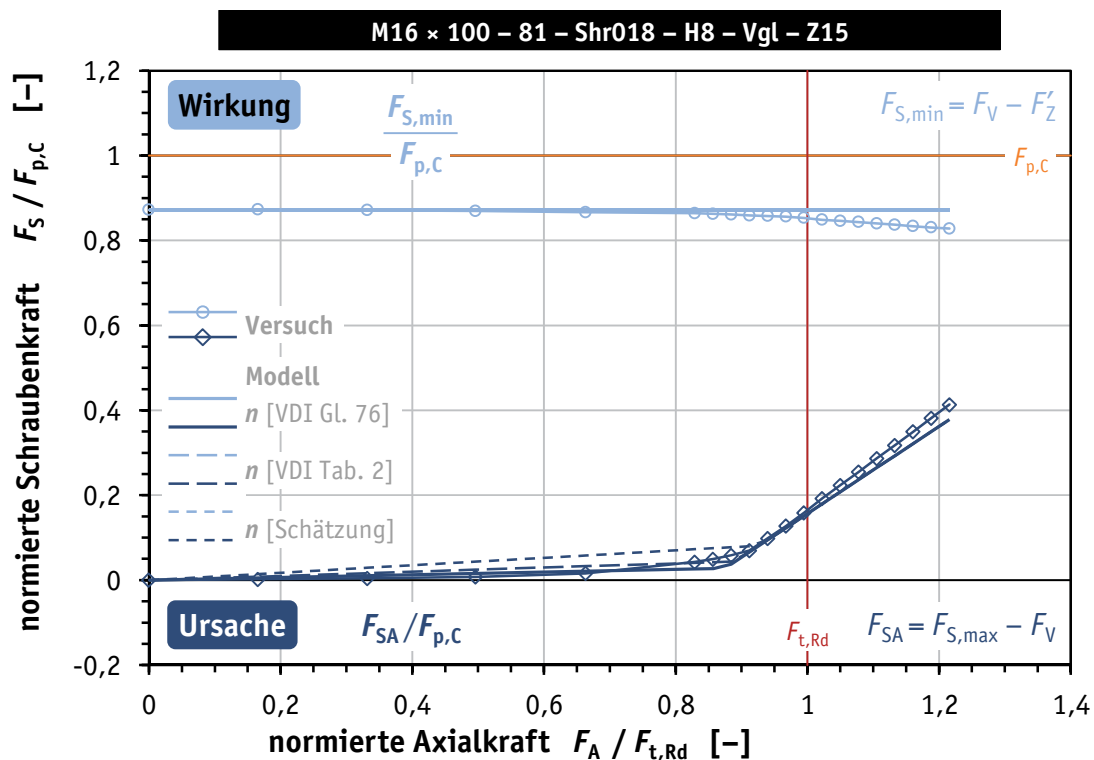


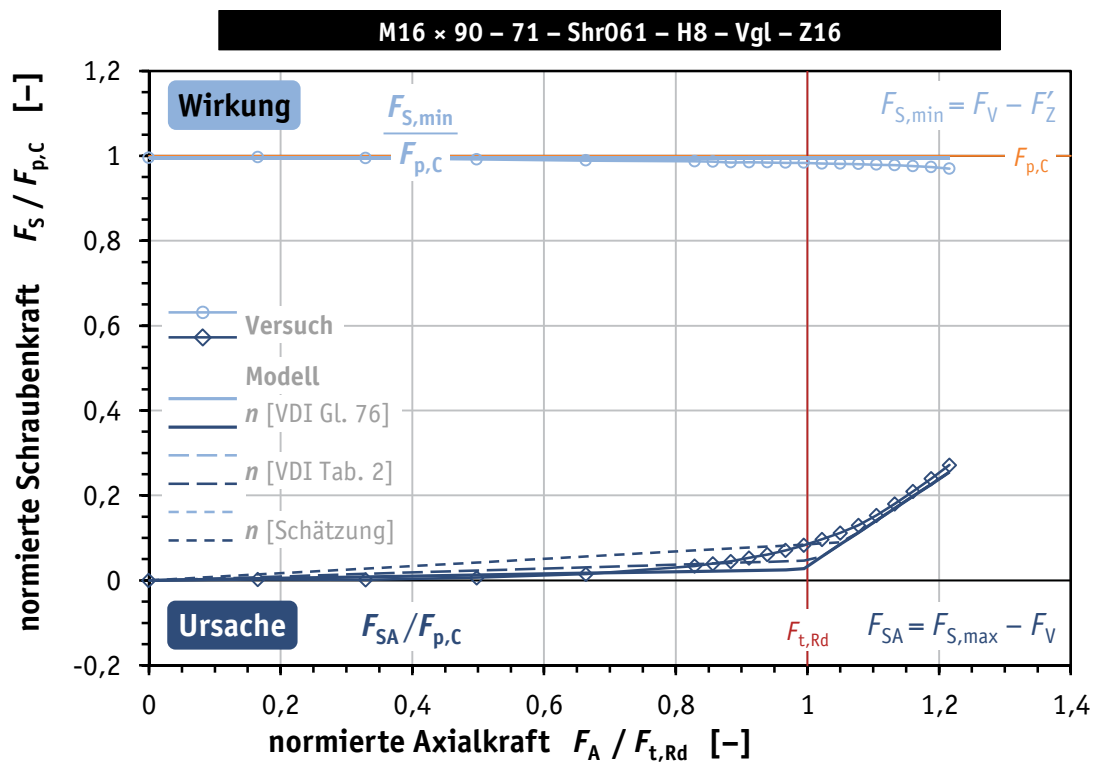
Bild D.20. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z14 (ohne DTI)

Figure D.20. Comparison test/model: component tensile test No. Z14 (without DTI)



**Bild D.21.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z15 (ohne DTI)

**Figure D.21.** Comparison test/model: component tensile test No. Z15 (without DTI)



**Bild D.22.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z16 (ohne DTI)

**Figure D.22.** Comparison test/model: component tensile test No. Z16 (without DTI)



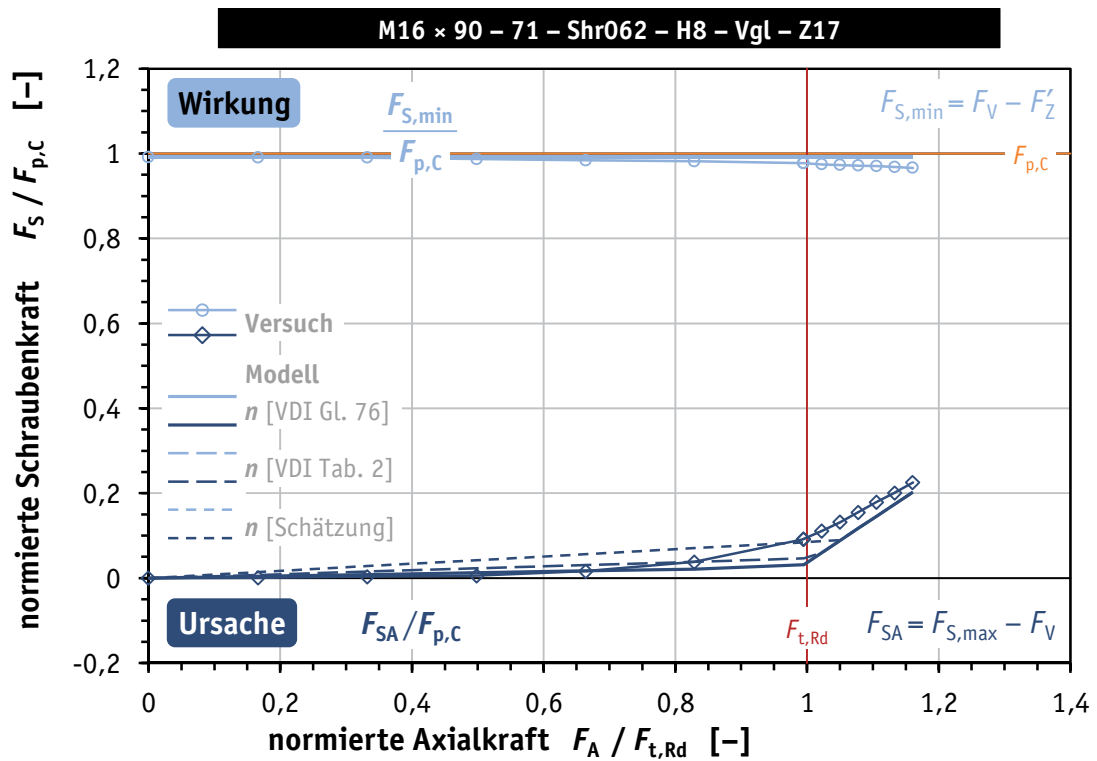


Bild D.23. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z17 (ohne DTI)

Figure D.23. Comparison test/model: component tensile test No. Z17 (without DTI)

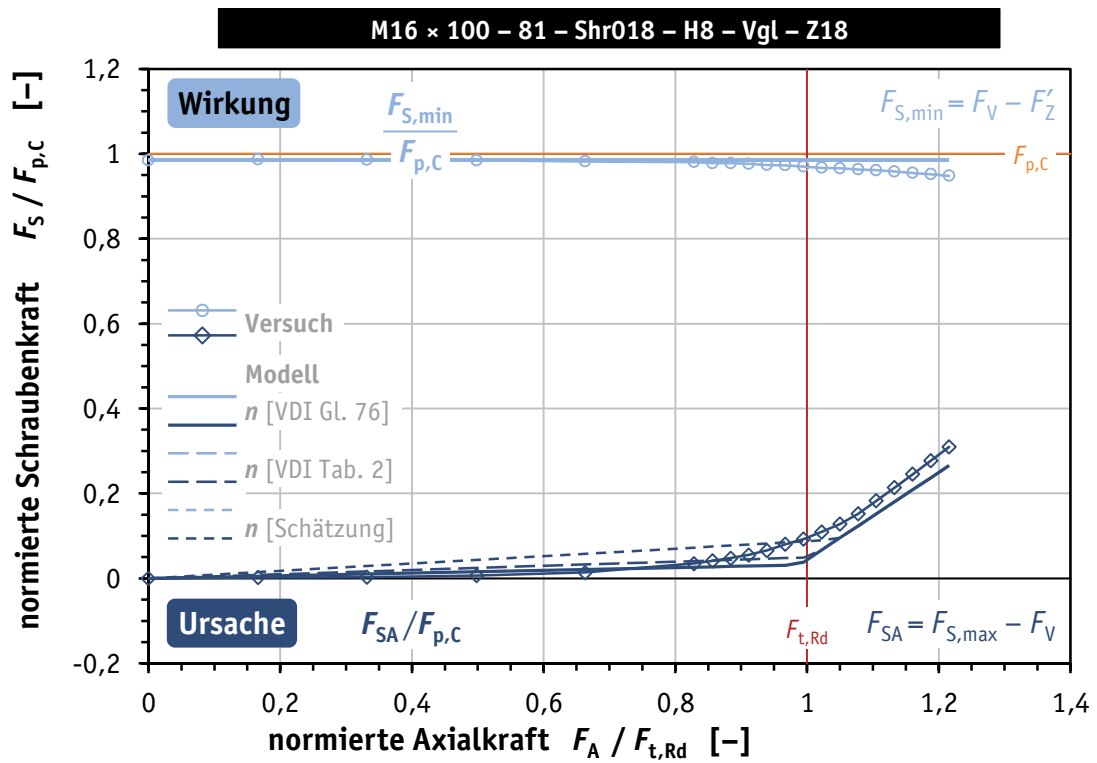
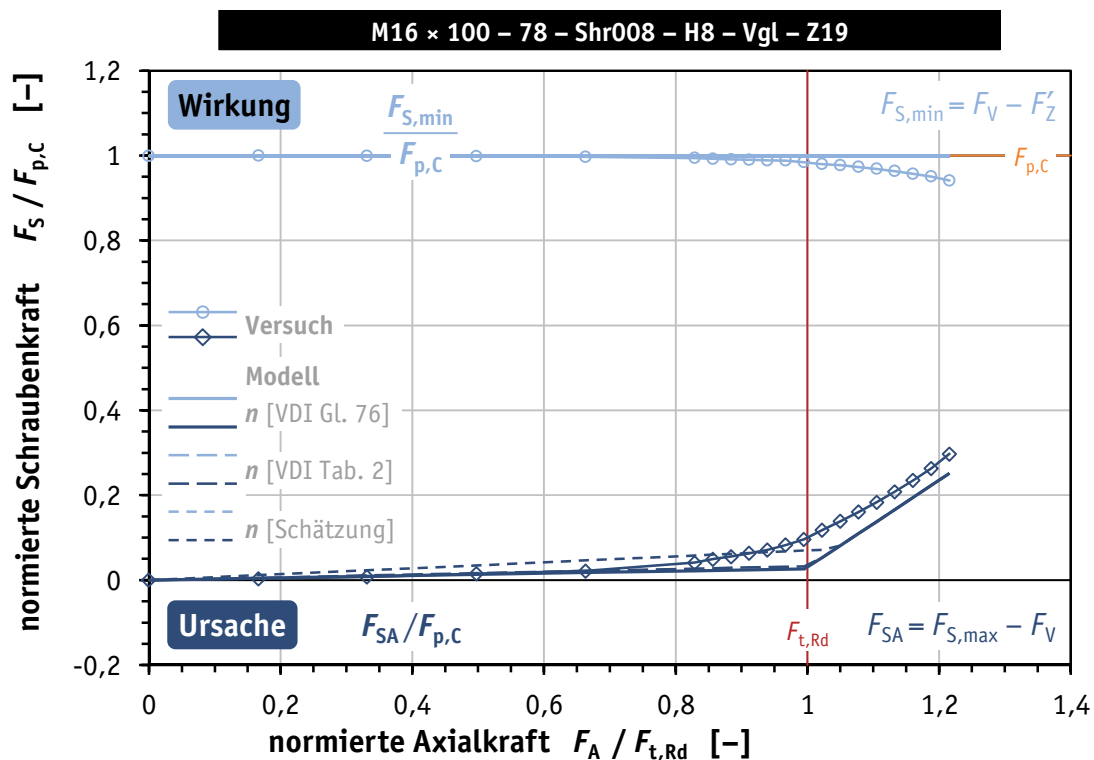


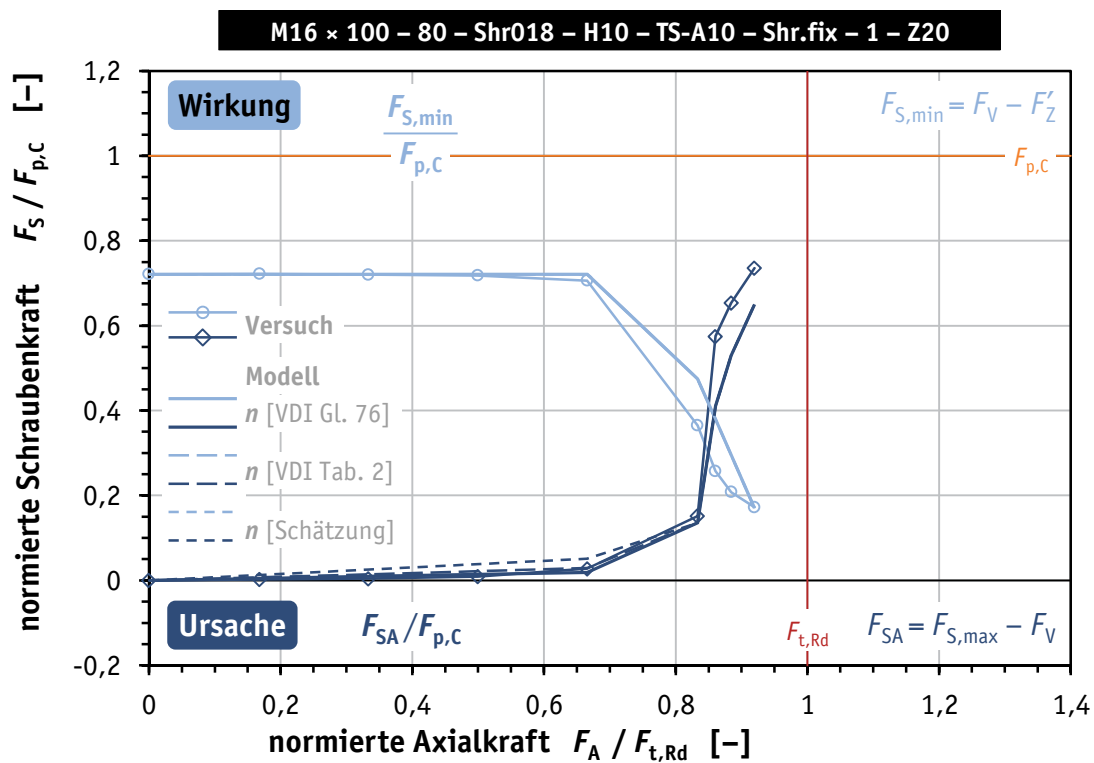
Bild D.24. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z18 (ohne DTI)

Figure D.24. Comparison test/model: component tensile test No. Z18 (without DTI)



**Bild D.25.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z19 (ohne DTI)

**Figure D.25.** Comparison test/model: component tensile test No. Z19 (without DTI)



**Bild D.26.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z20 (mit DTI)

**Figure D.26.** Comparison test/model: component tensile test No. Z20 (including DTI)

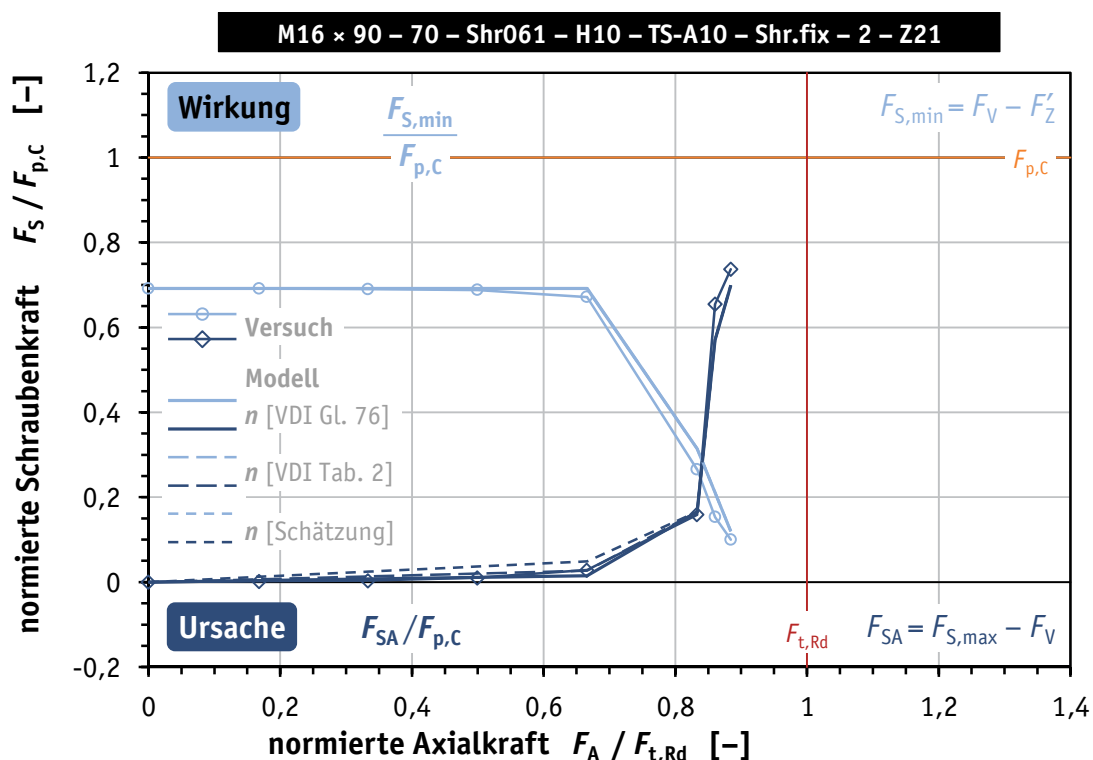


Bild D.27. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z21 (mit DTI)

Figure D.27. Comparison test/model: component tensile test No. Z21 (including DTI)

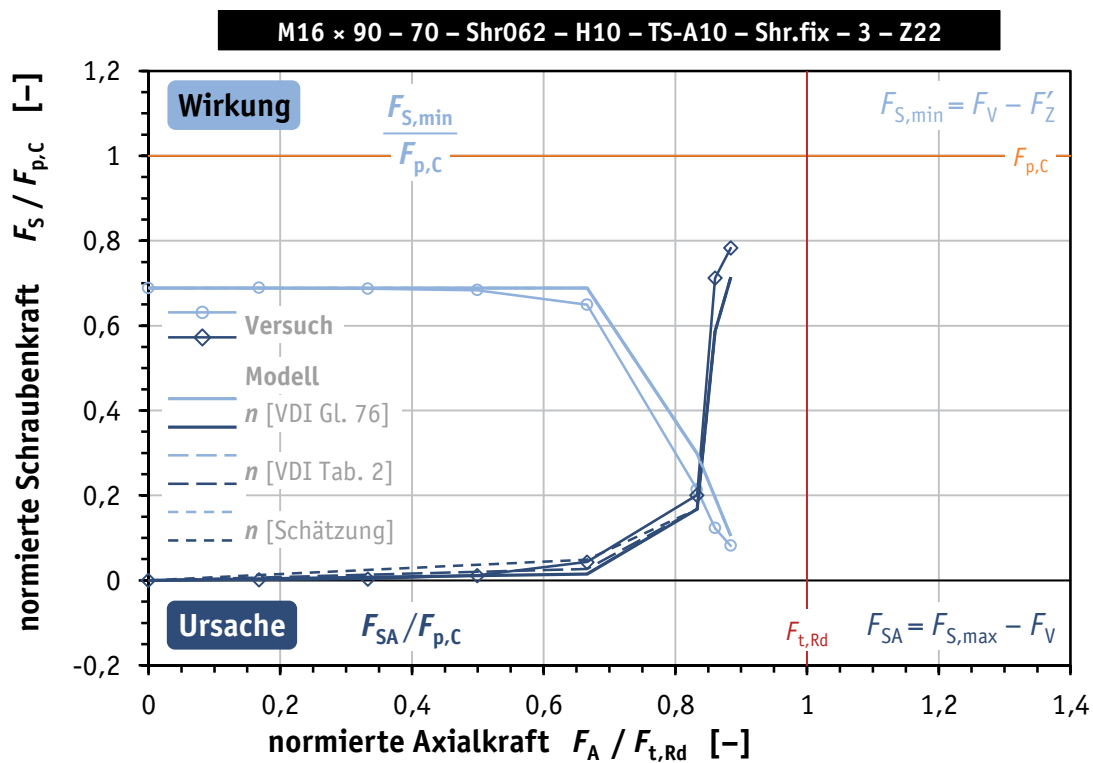
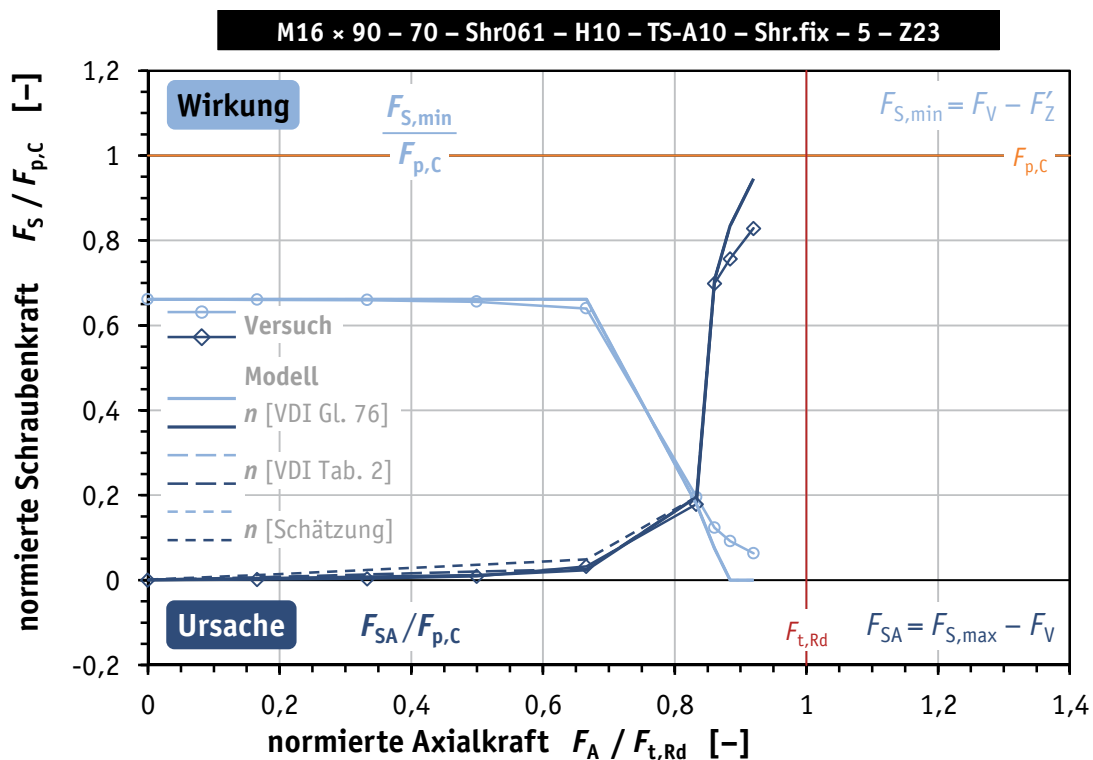


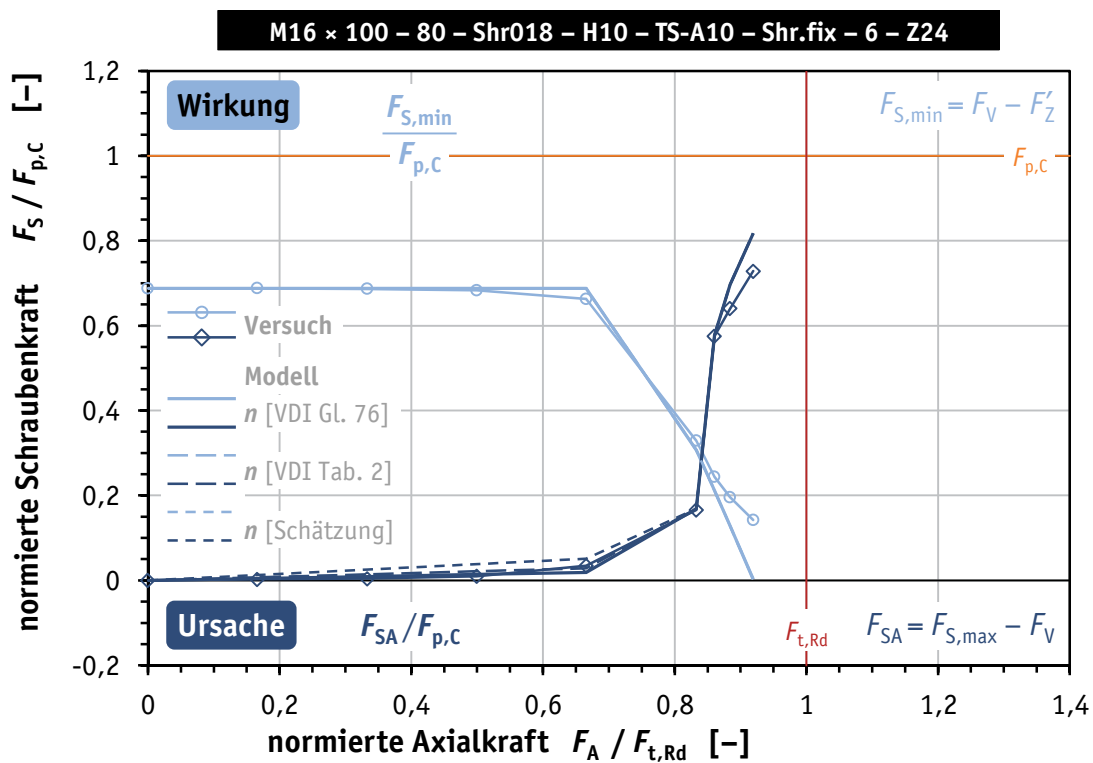
Bild D.28. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z22 (mit DTI)

Figure D.28. Comparison test/model: component tensile test No. Z22 (including DTI)



**Bild D.29.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z23 (mit DTI)

**Figure D.29.** Comparison test/model: component tensile test No. Z23 (including DTI)



**Bild D.30.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z24 (mit DTI)

**Figure D.30.** Comparison test/model: component tensile test No. Z24 (including DTI)

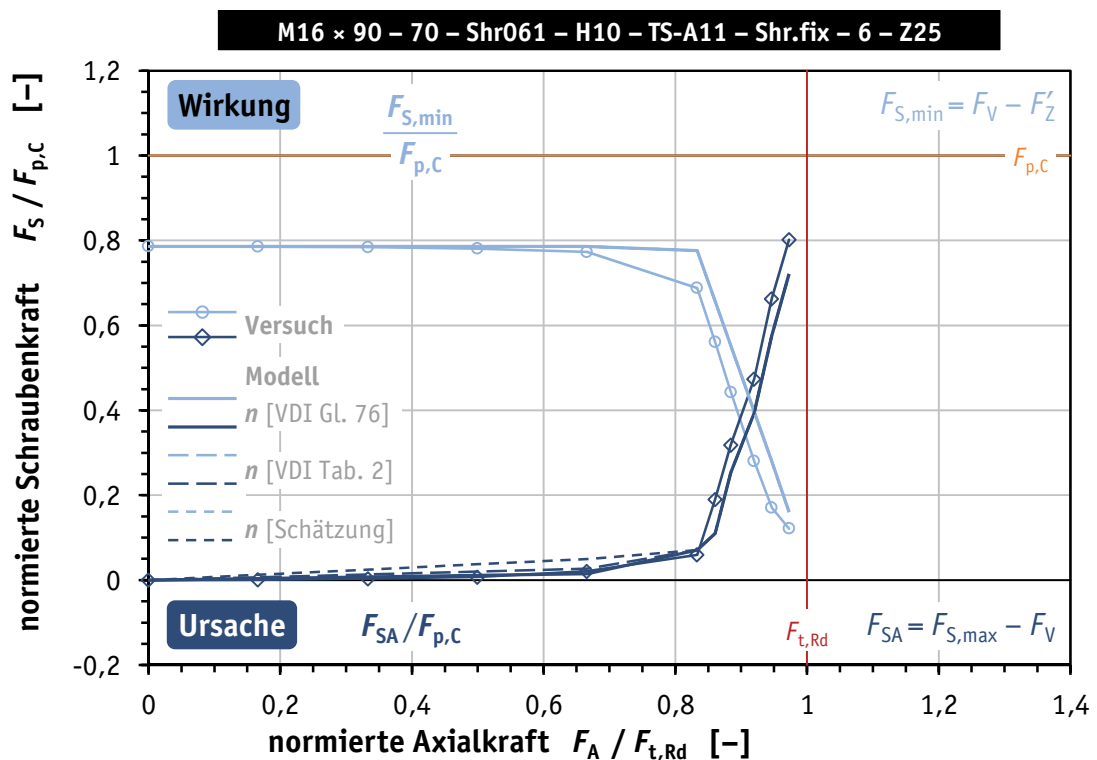


Bild D.31. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z25 (mit DTI)

Figure D.31. Comparison test/model: component tensile test No. Z25 (including DTI)

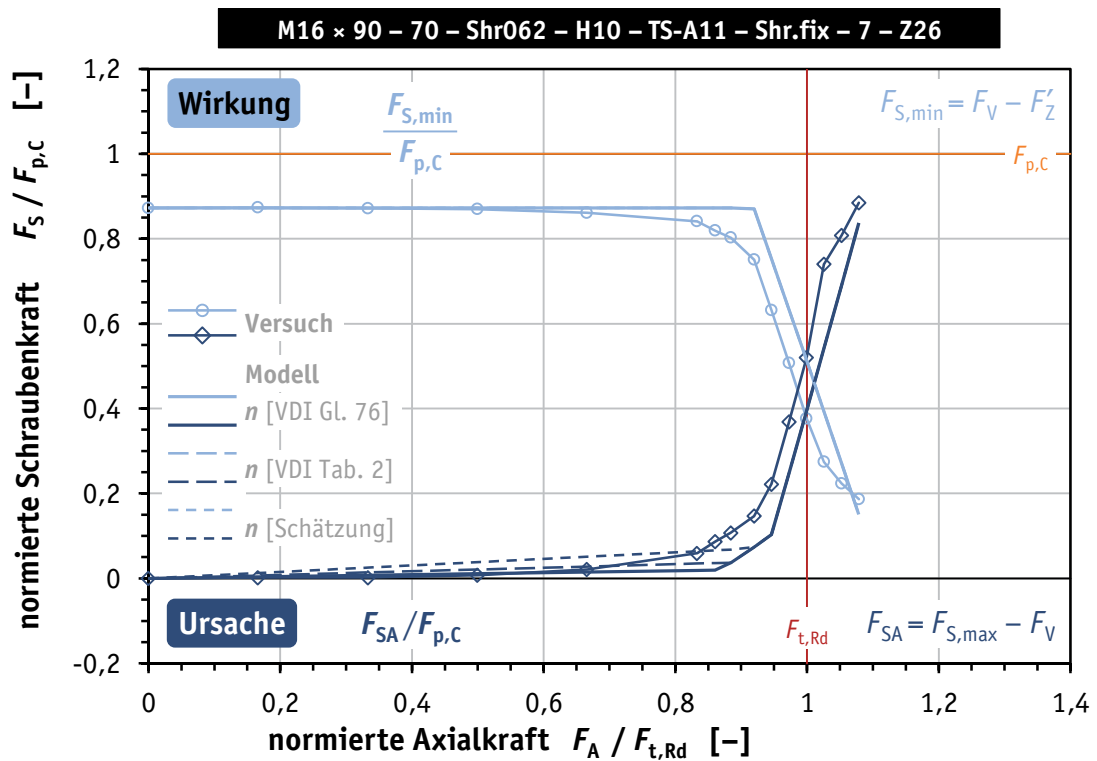


Bild D.32. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z26 (mit DTI)

Figure D.32. Comparison test/model: component tensile test No. Z26 (including DTI)

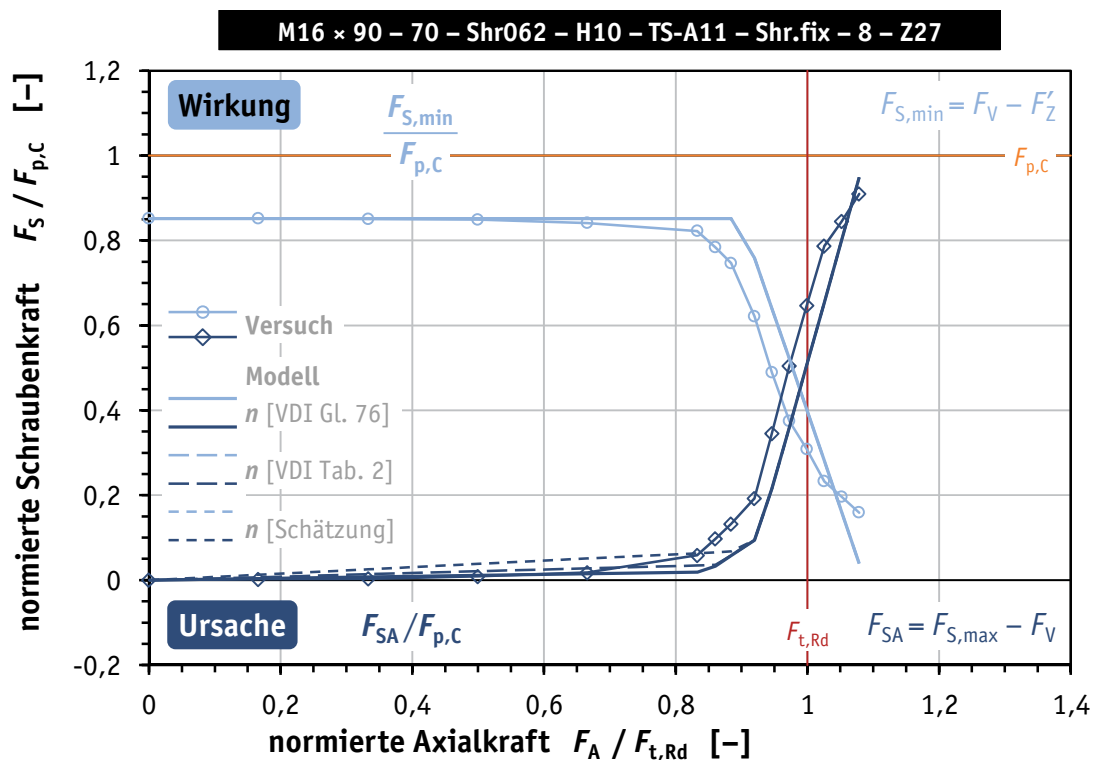


Bild D.33. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z27 (mit DTI)

Figure D.33. Comparison test/model: component tensile test No. Z27 (including DTI)

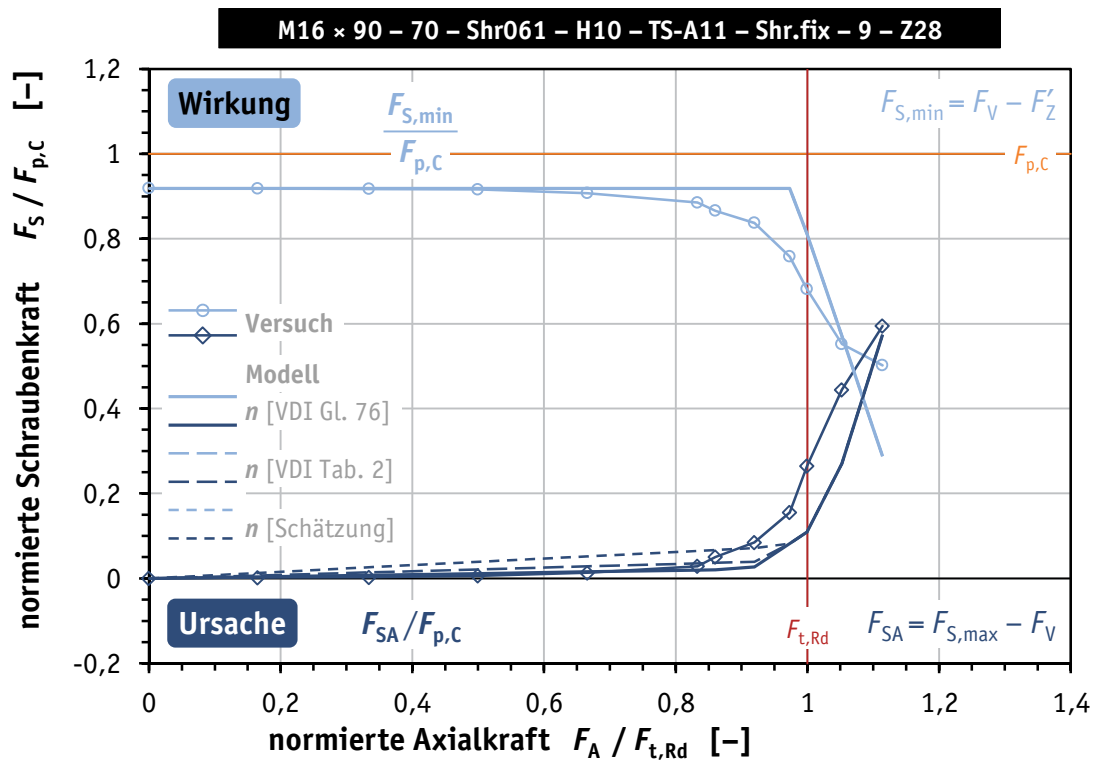


Bild D.34. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z28 (mit DTI)

Figure D.34. Comparison test/model: component tensile test No. Z28 (including DTI)

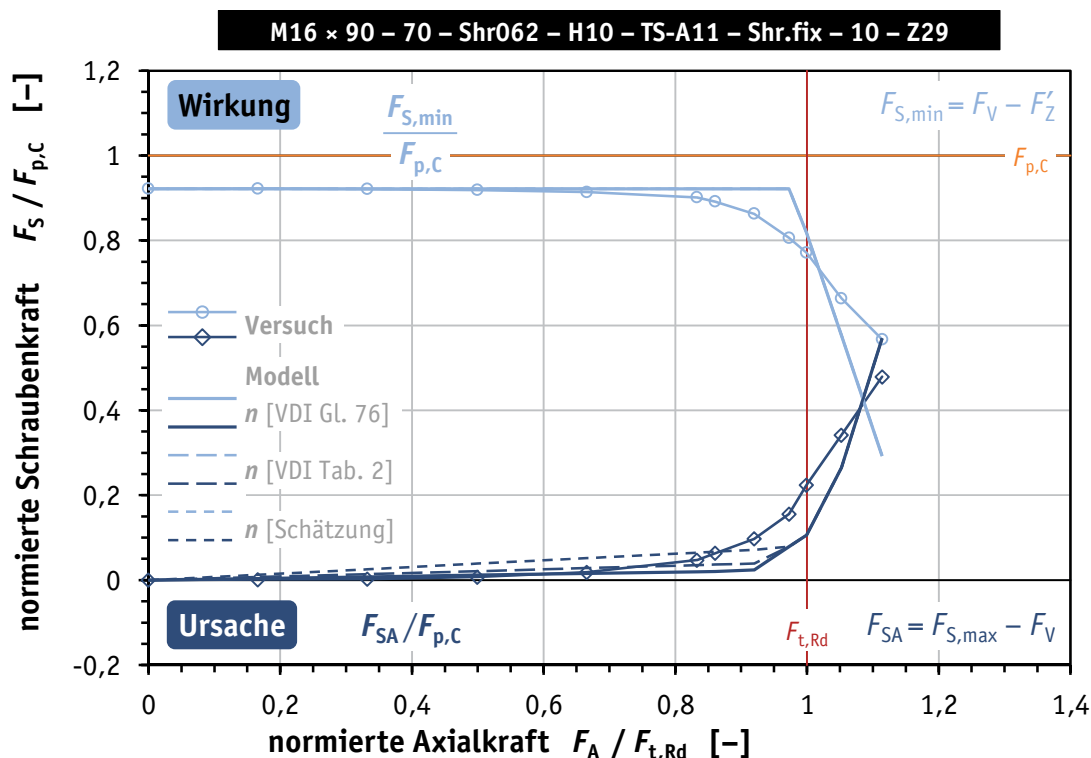


Bild D.35. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z29 (mit DTI)

Figure D.35. Comparison test/model: component tensile test No. Z29 (including DTI)

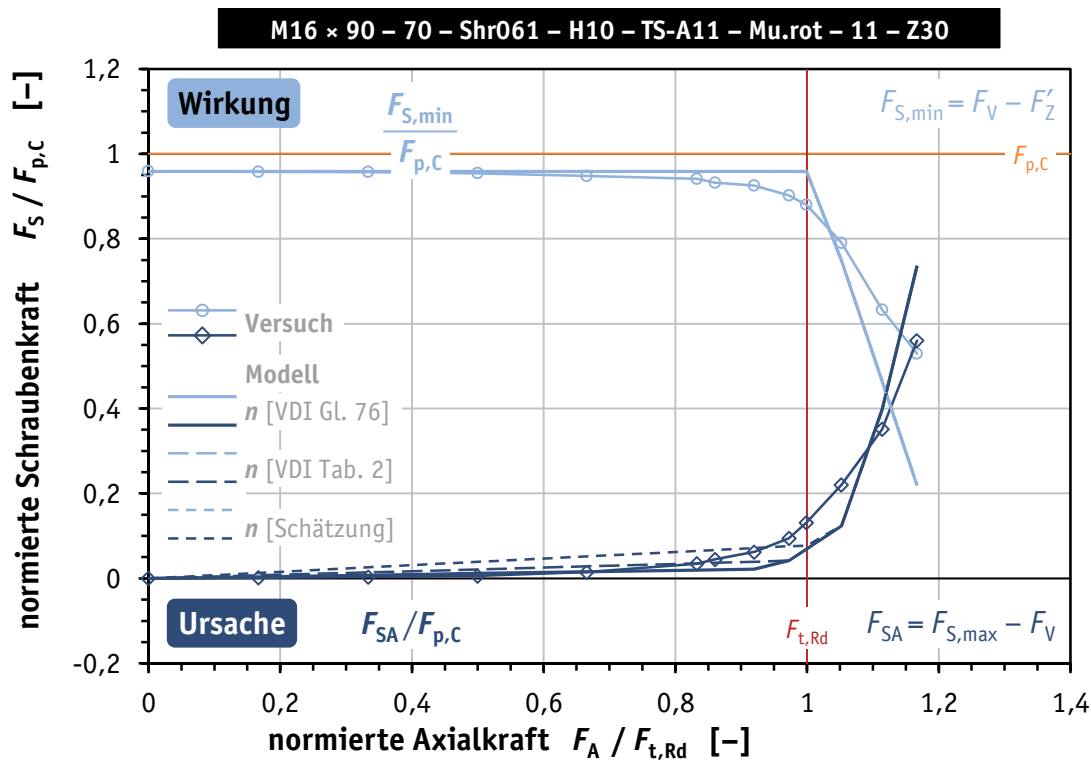
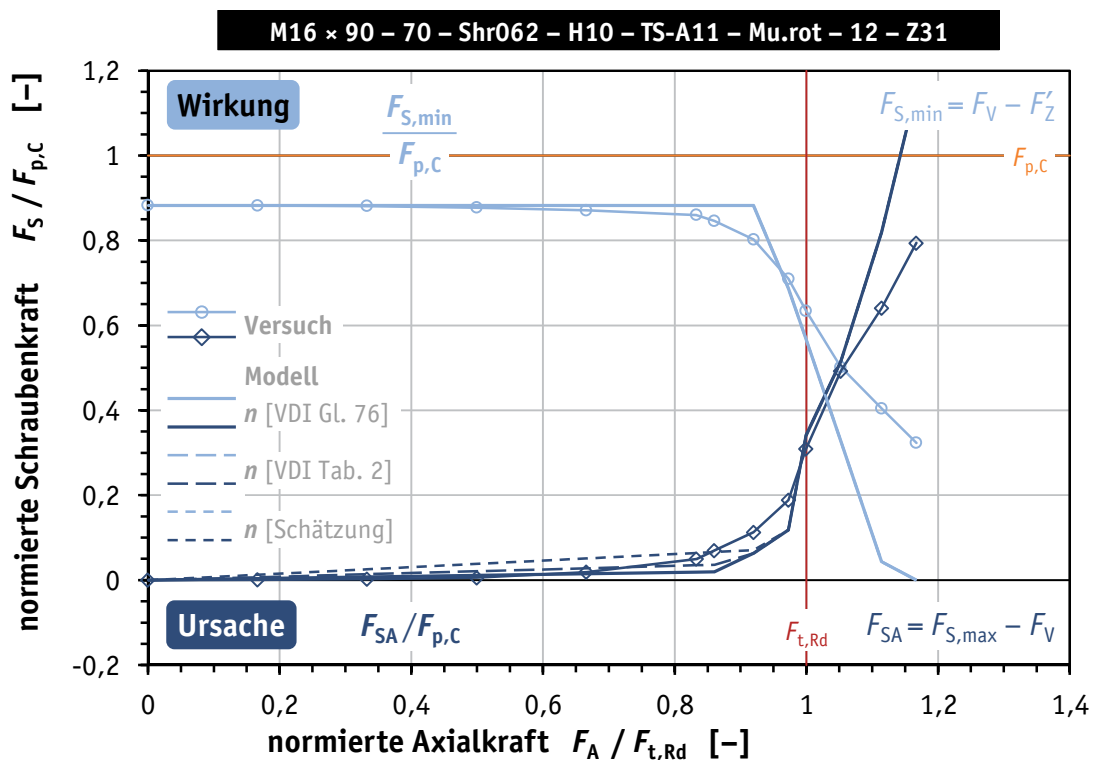


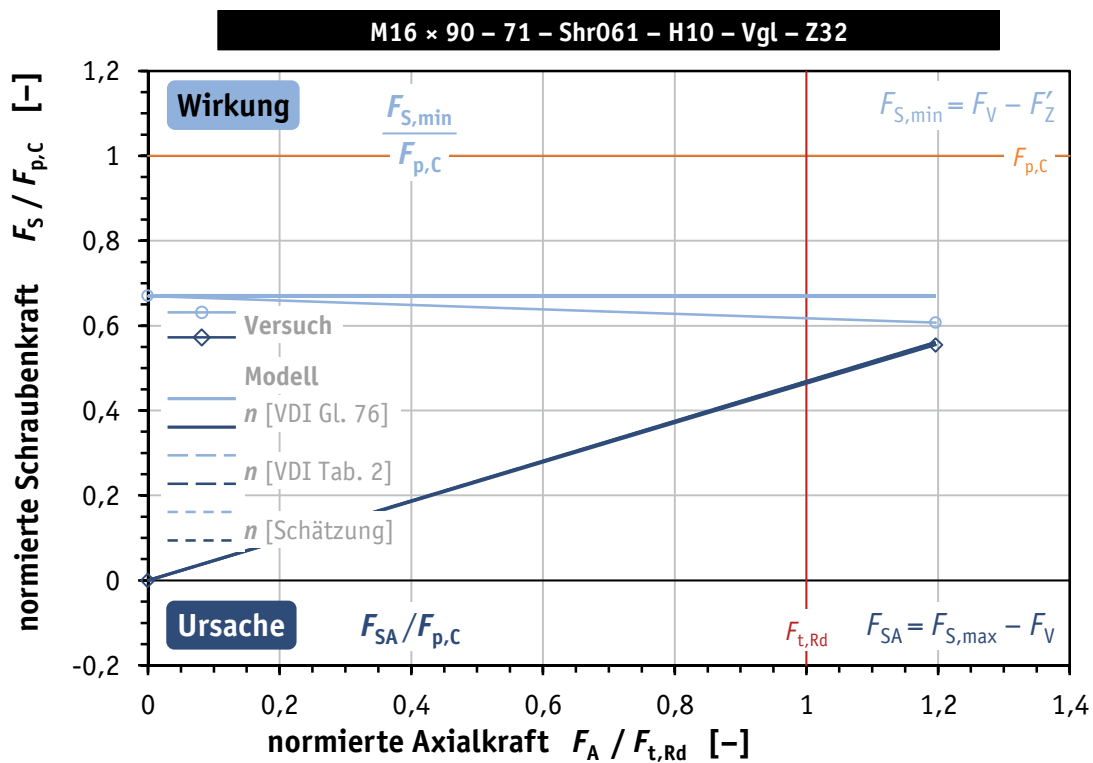
Bild D.36. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z30 (mit DTI)

Figure D.36. Comparison test/model: component tensile test No. Z30 (including DTI)



**Bild D.37.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z31 (mit DTI)

**Figure D.37.** Comparison test/model: component tensile test No. Z31 (including DTI)



**Bild D.38.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z32 (ohne DTI)

**Figure D.38.** Comparison test/model: component tensile test No. Z32 (without DTI)



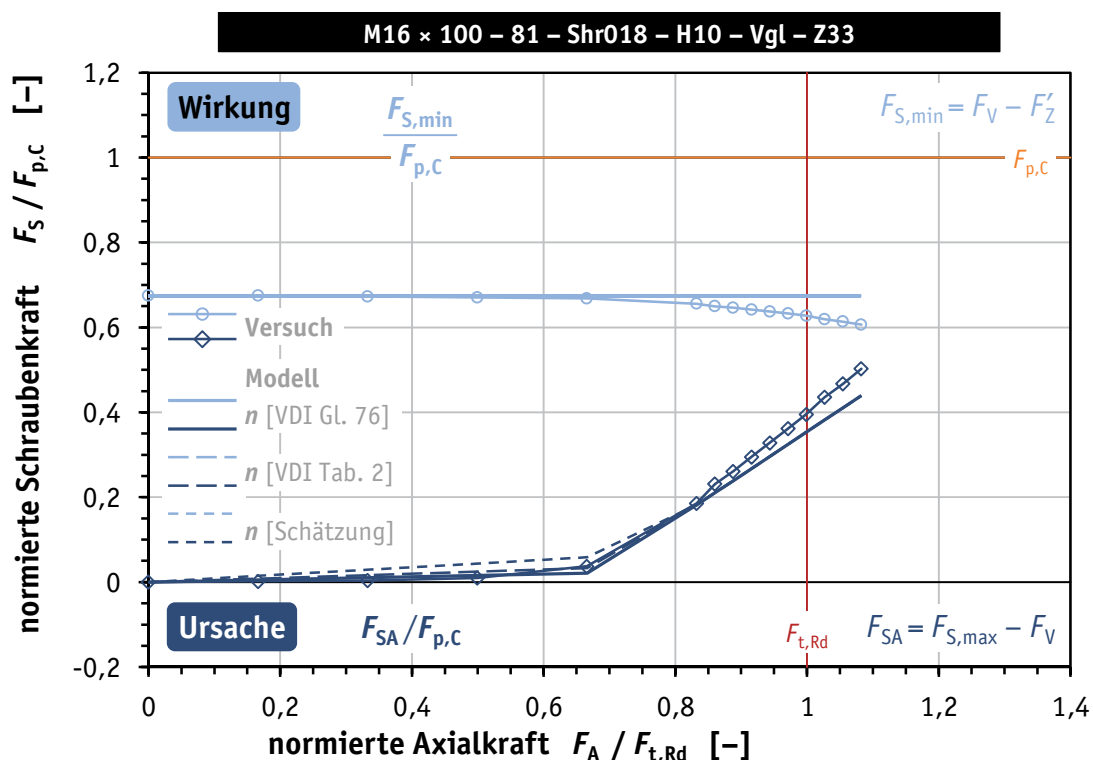


Bild D.39. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z33 (ohne DTI)

Figure D.39. Comparison test/model: component tensile test No. Z33 (without DTI)

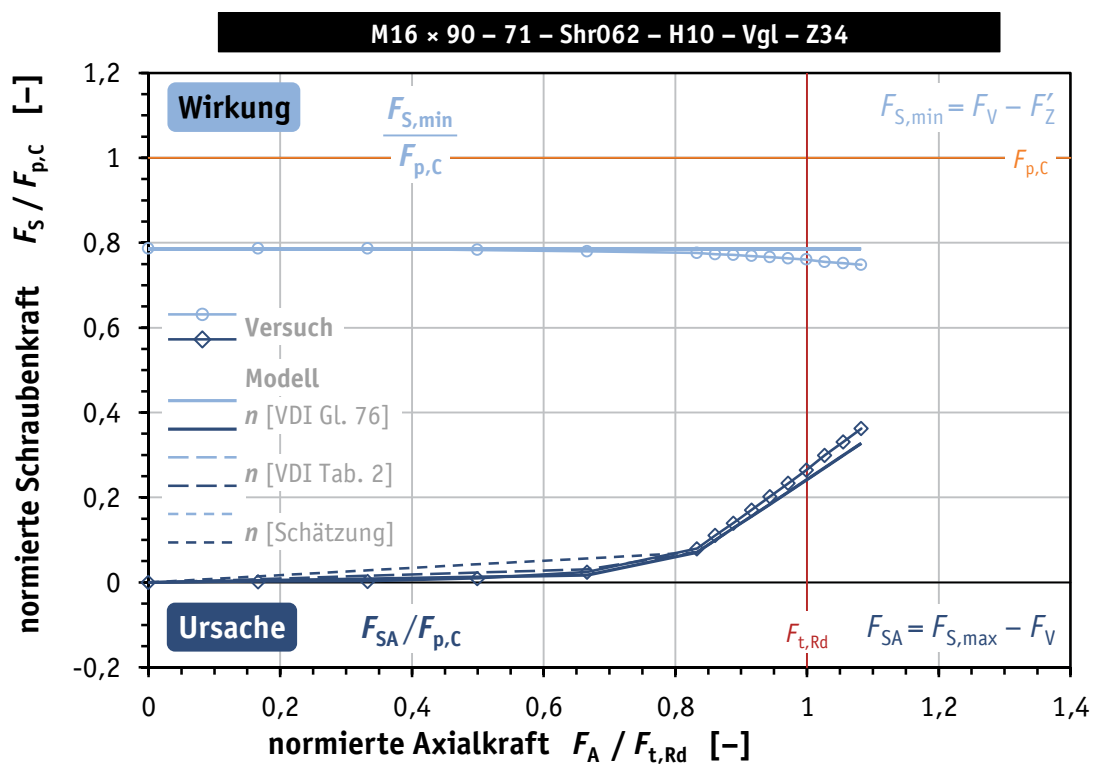


Bild D.40. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z34 (ohne DTI)

Figure D.40. Comparison test/model: component tensile test No. Z34 (without DTI)

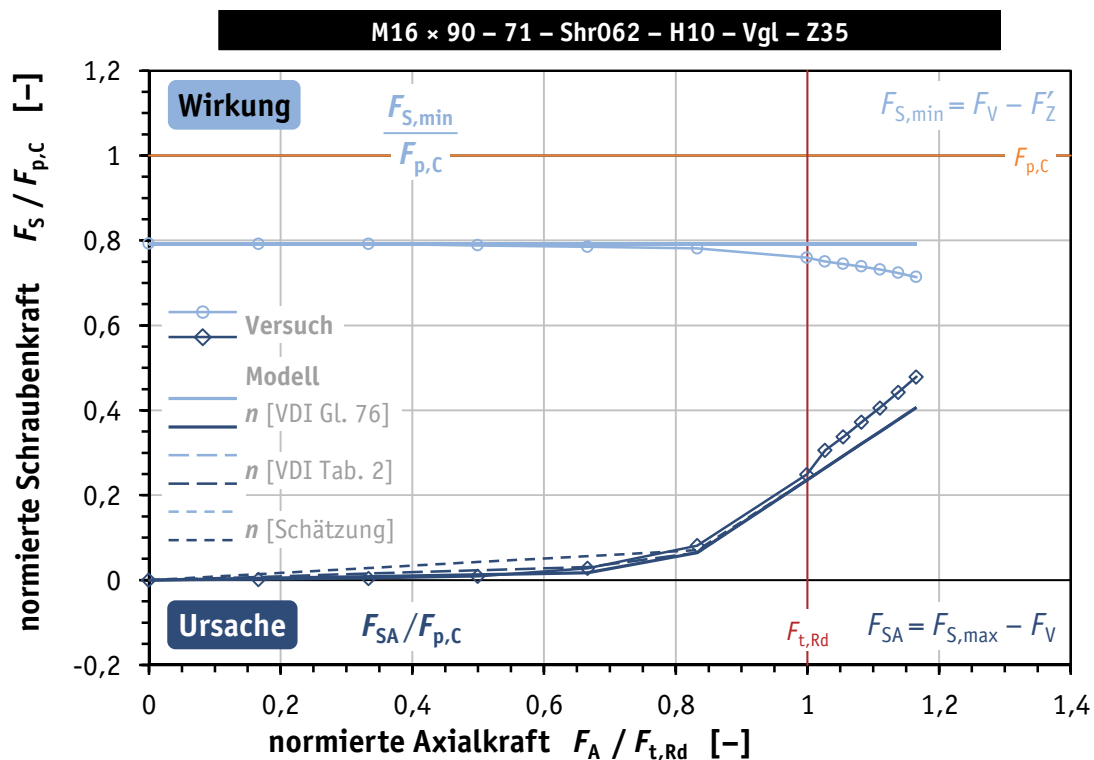


Bild D.41. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z35 (ohne DTI)

Figure D.41. Comparison test/model: component tensile test No. Z35 (without DTI)

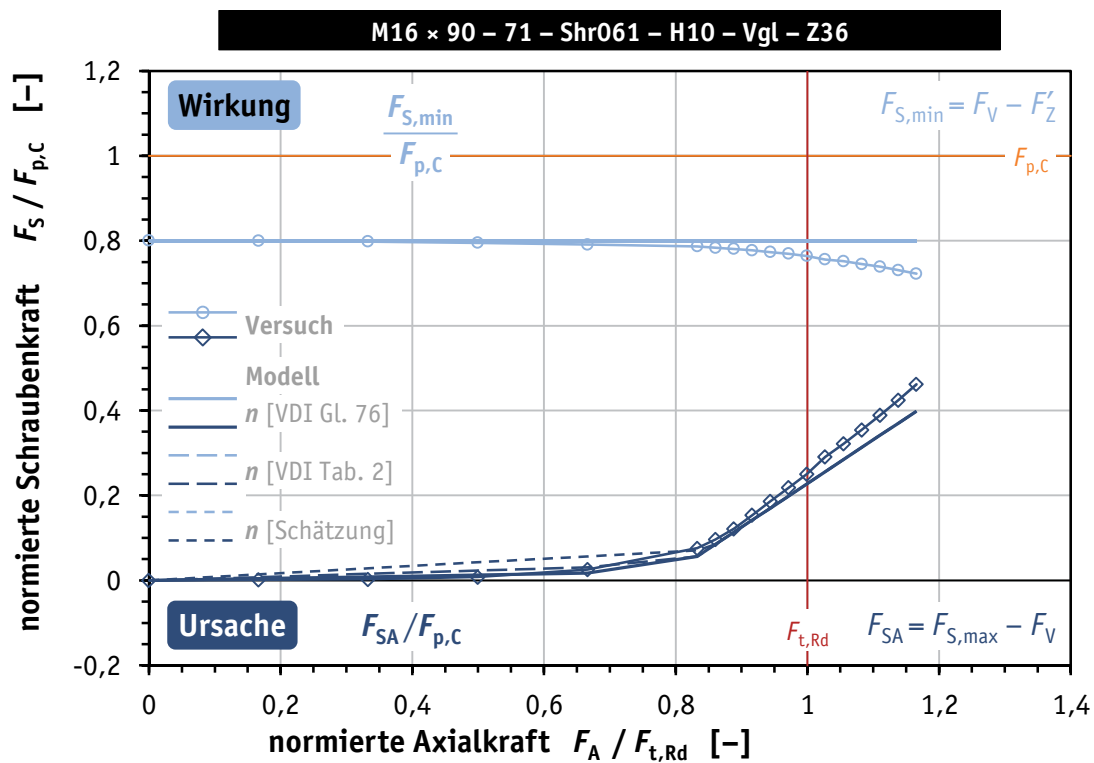


Bild D.42. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z36 (ohne DTI)

Figure D.42. Comparison test/model: component tensile test No. Z36 (without DTI)

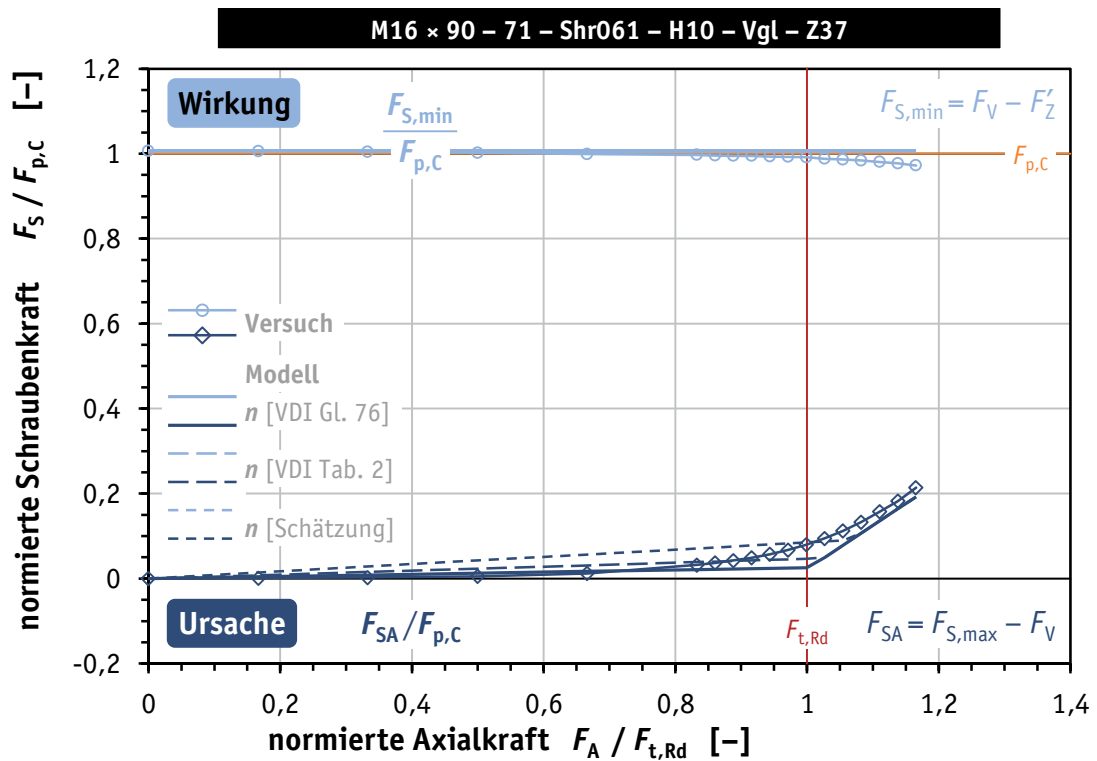


Bild D.43. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z37 (ohne DTI)

Figure D.43. Comparison test/model: component tensile test No. Z37 (without DTI)

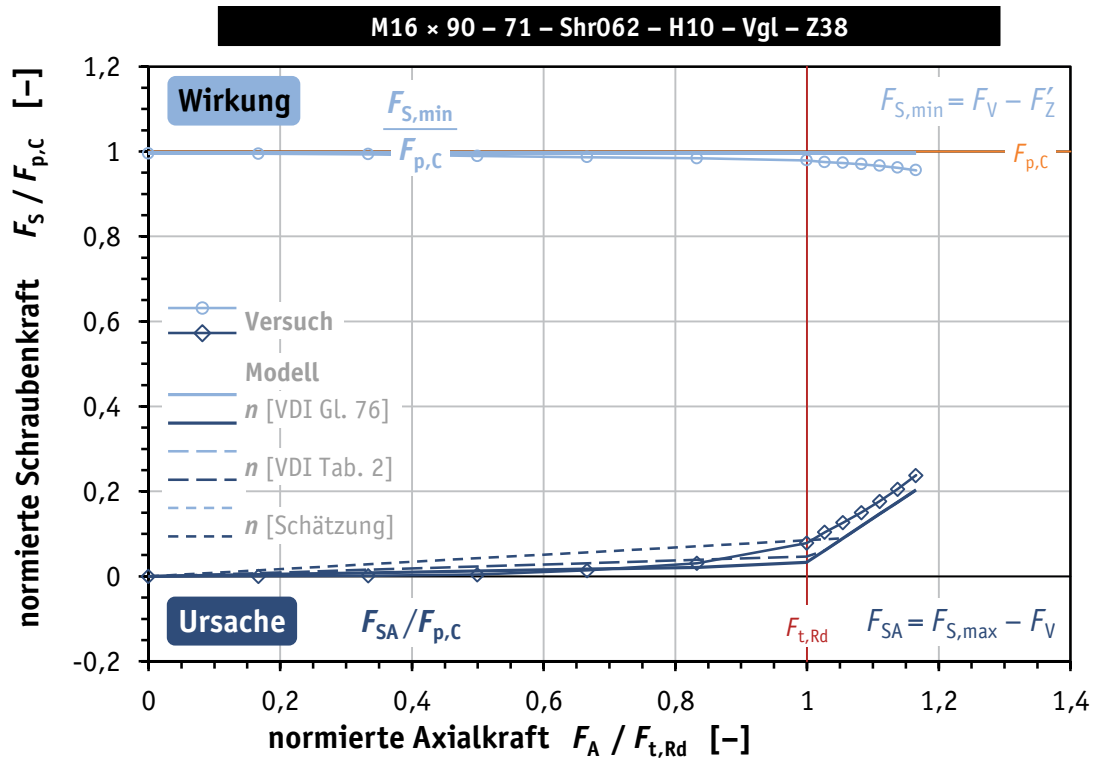
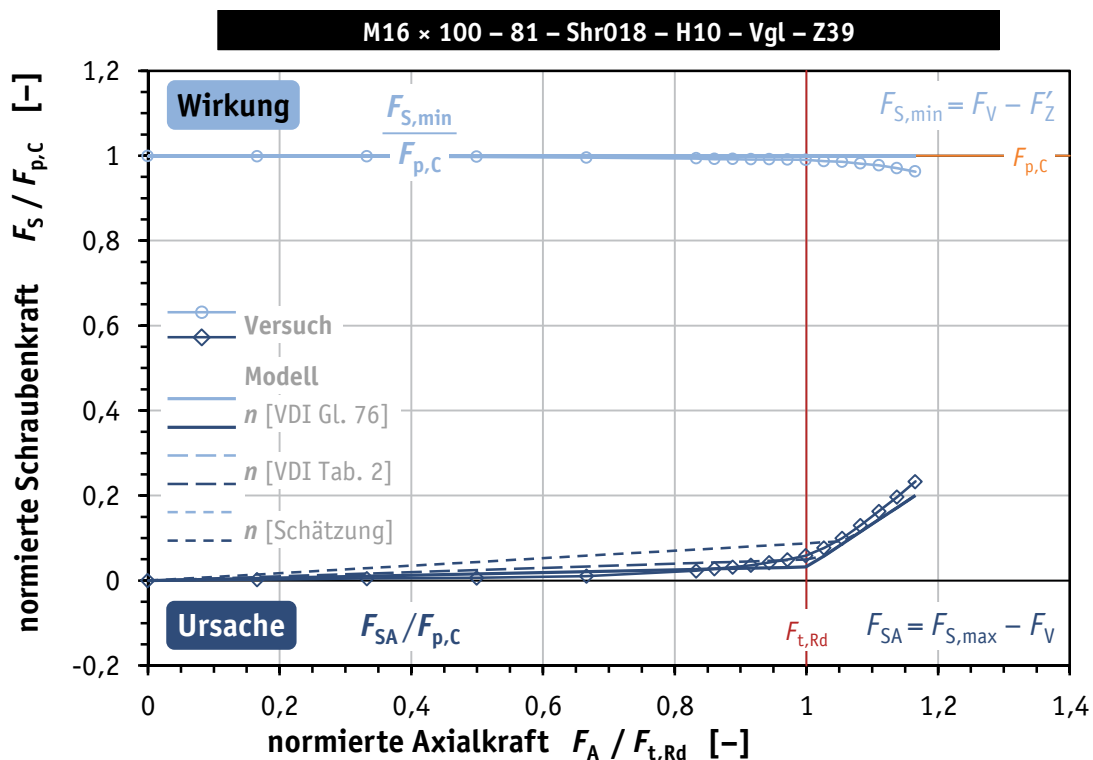


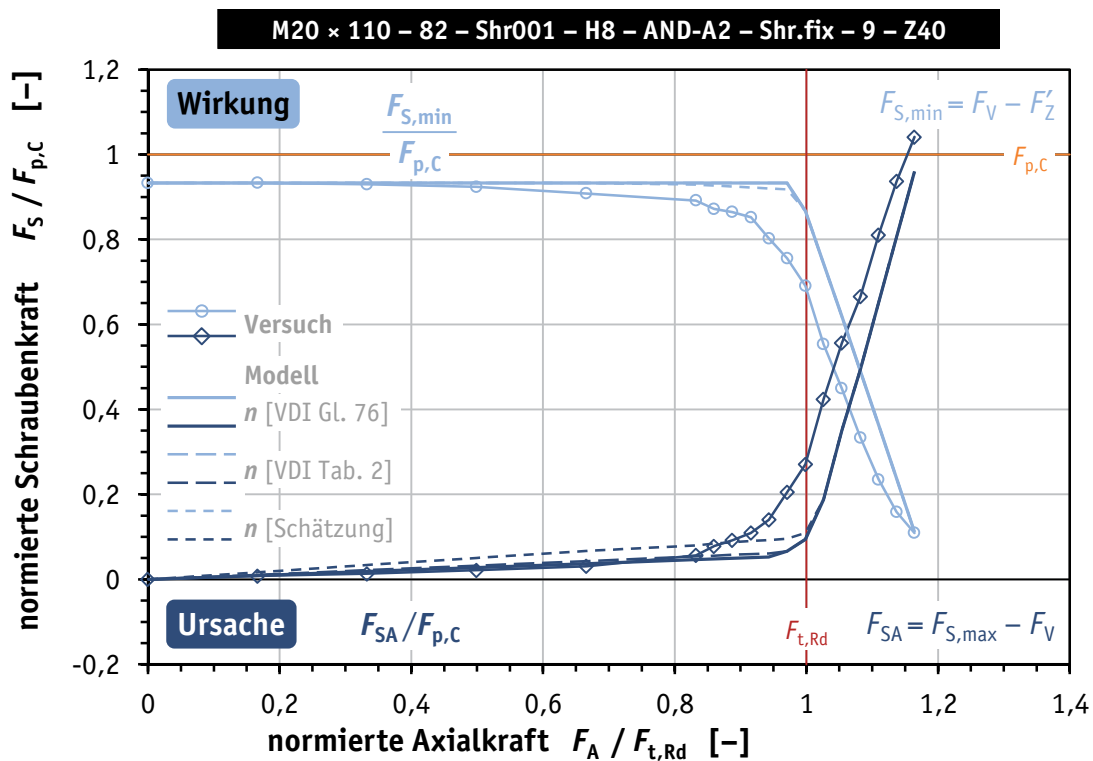
Bild D.44. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z38 (ohne DTI)

Figure D.44. Comparison test/model: component tensile test No. Z38 (without DTI)



**Bild D.45.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z39 (ohne DTI)

**Figure D.45.** Comparison test/model: component tensile test No. Z39 (without DTI)



**Bild D.46.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z40 (mit DTI)

**Figure D.46.** Comparison test/model: component tensile test No. Z40 (including DTI)

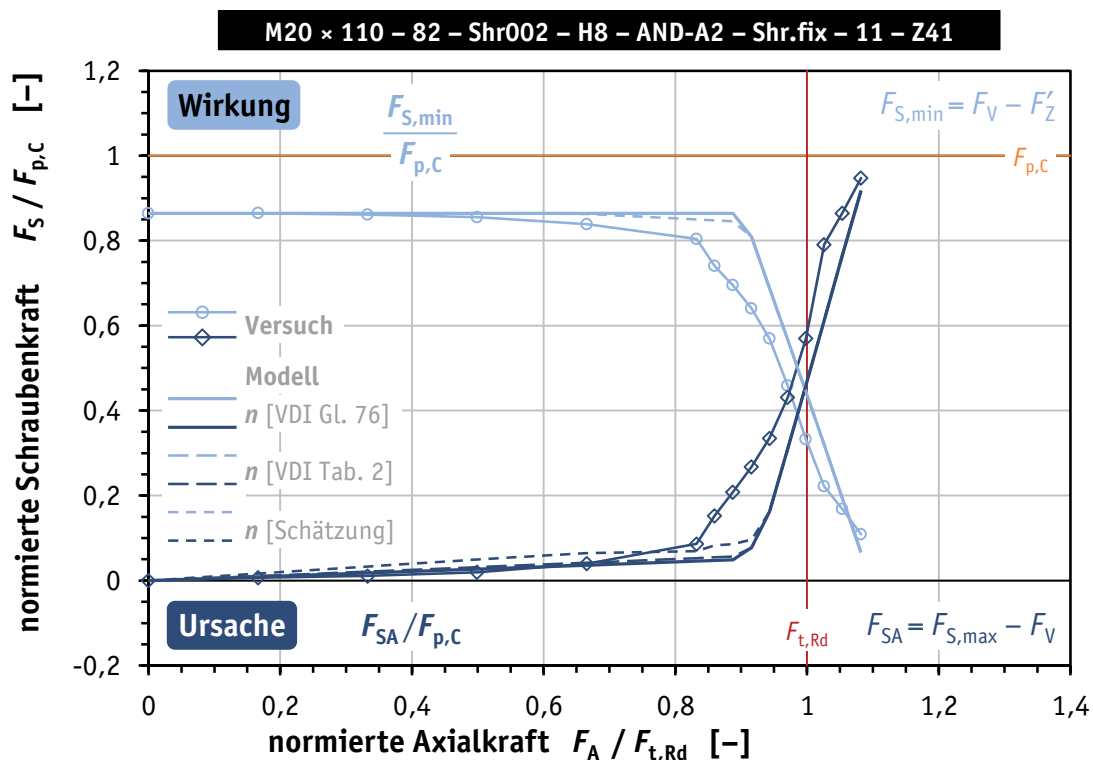


Bild D.47. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z41 (mit DTI)

Figure D.47. Comparison test/model: component tensile test No. Z41 (including DTI)

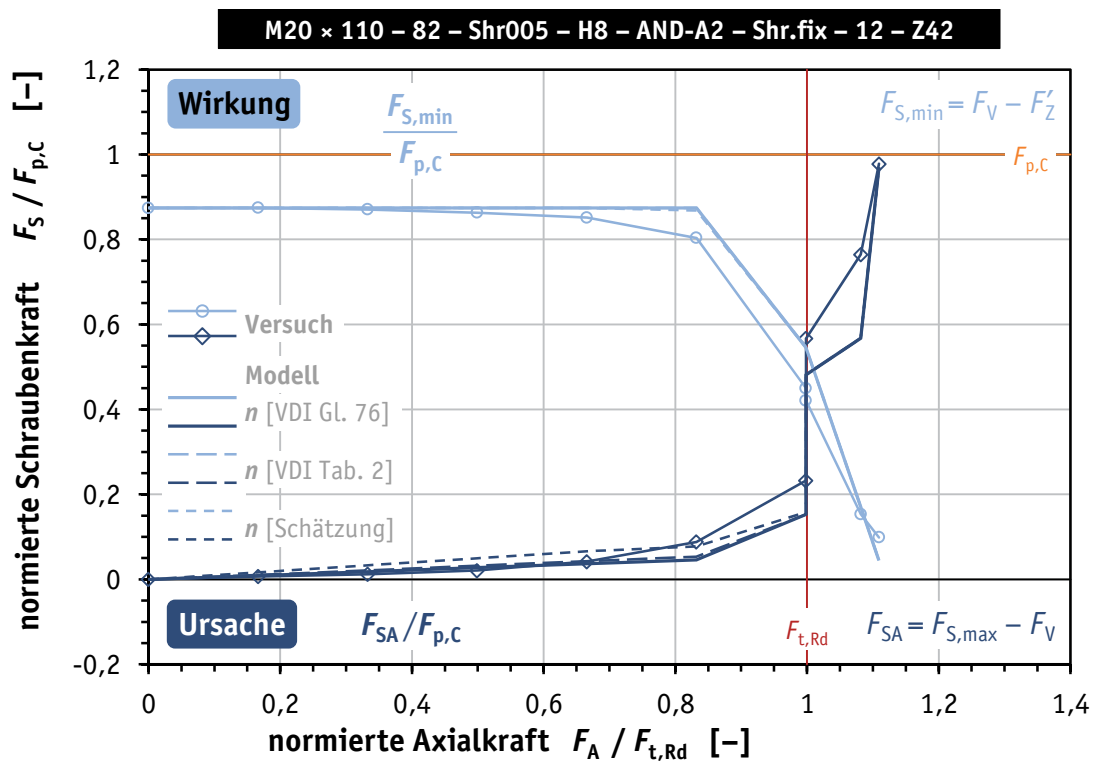
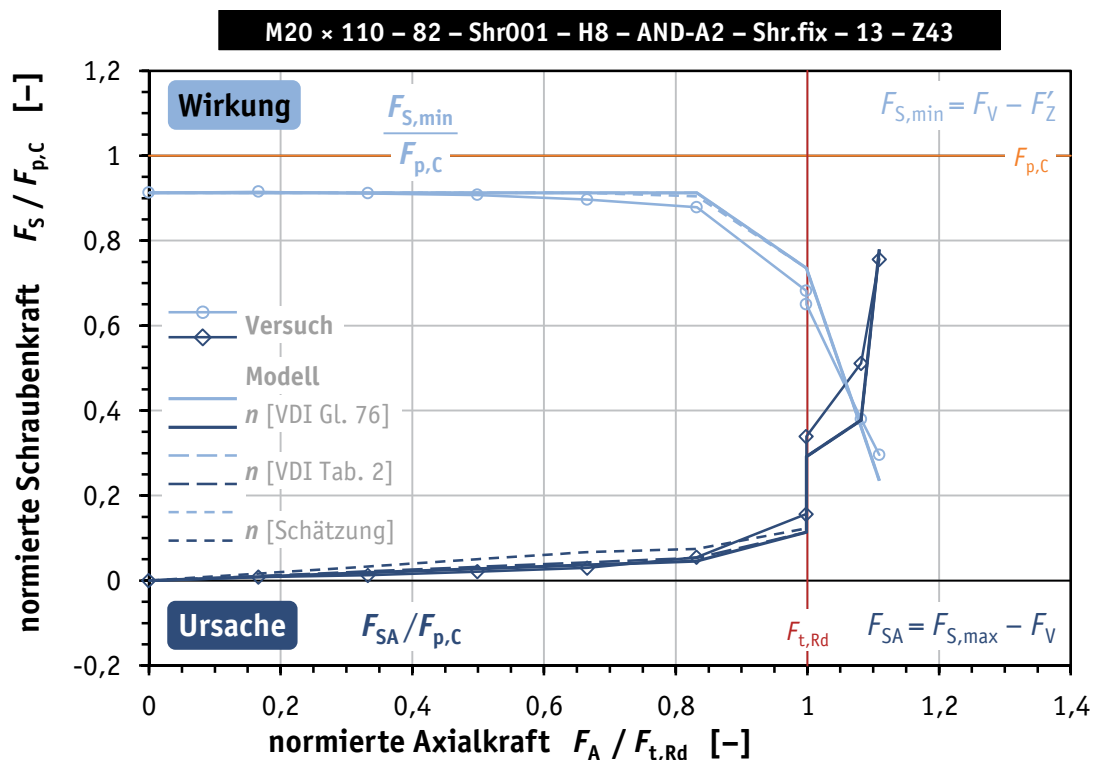


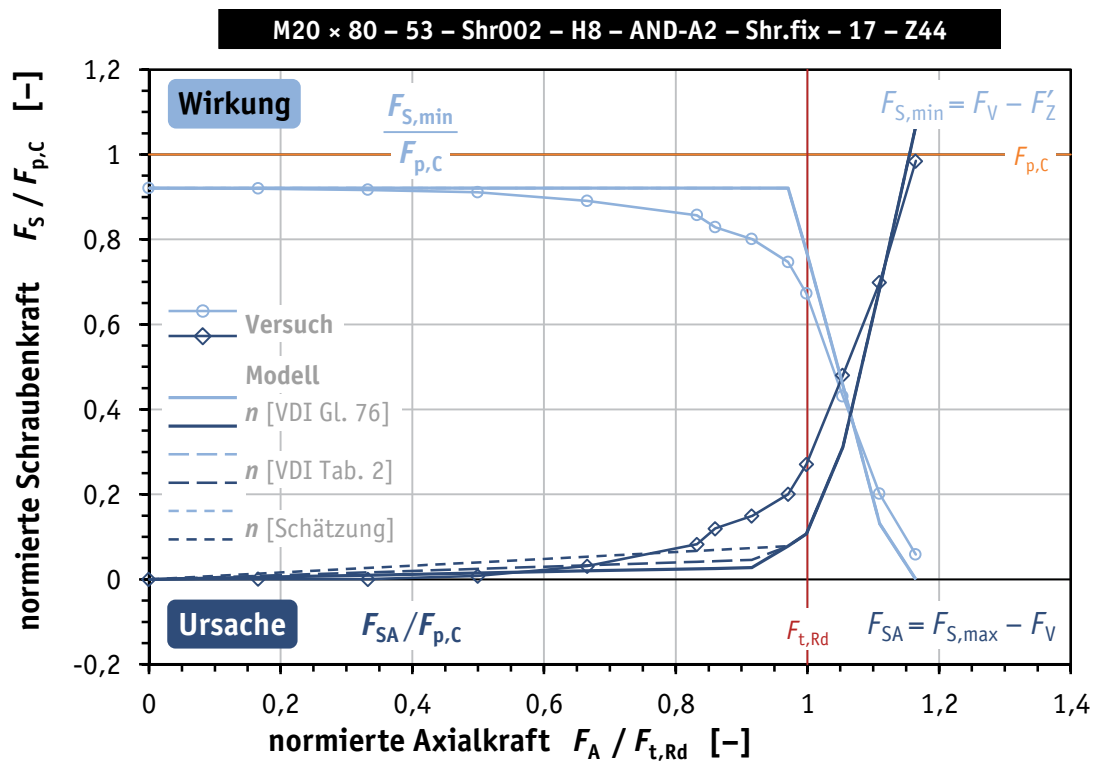
Bild D.48. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z42 (mit DTI)

Figure D.48. Comparison test/model: component tensile test No. Z42 (including DTI)



**Bild D.49.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z43 (mit DTI)

**Figure D.49.** Comparison test/model: component tensile test No. Z43 (including DTI)



**Bild D.50.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z44 (mit DTI)

**Figure D.50.** Comparison test/model: component tensile test No. Z44 (including DTI)

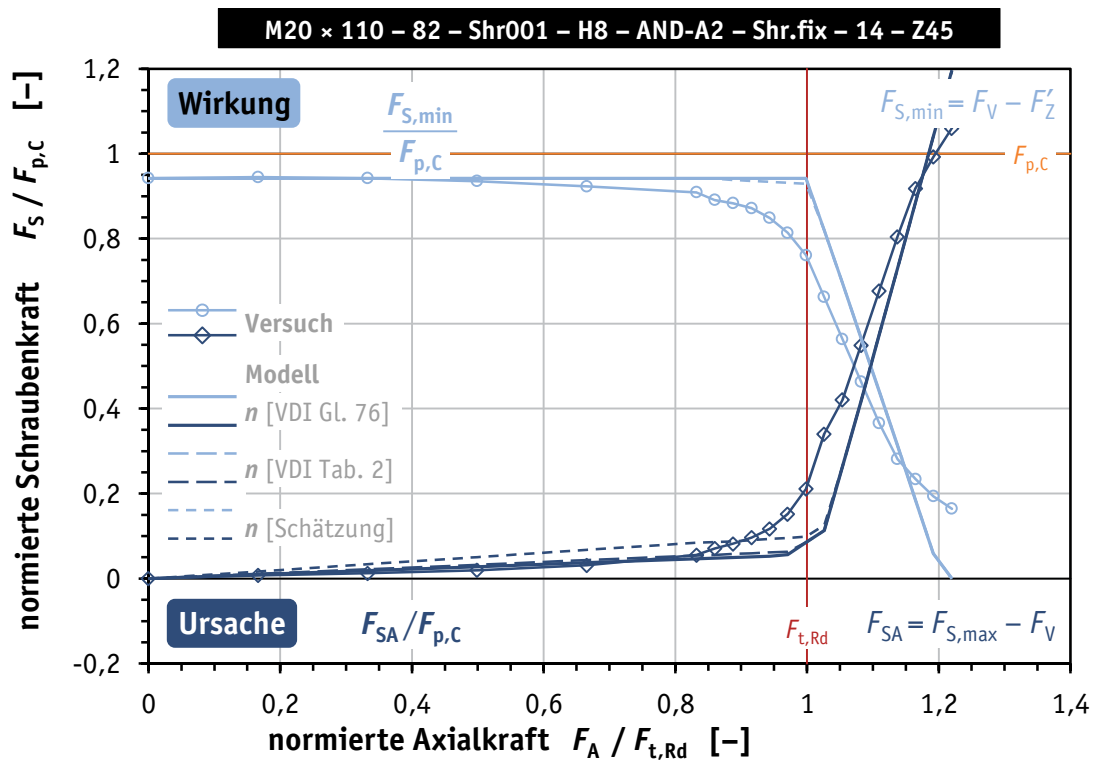


Bild D.51. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z45 (mit DTI)

Figure D.51. Comparison test/model: component tensile test No. Z45 (including DTI)

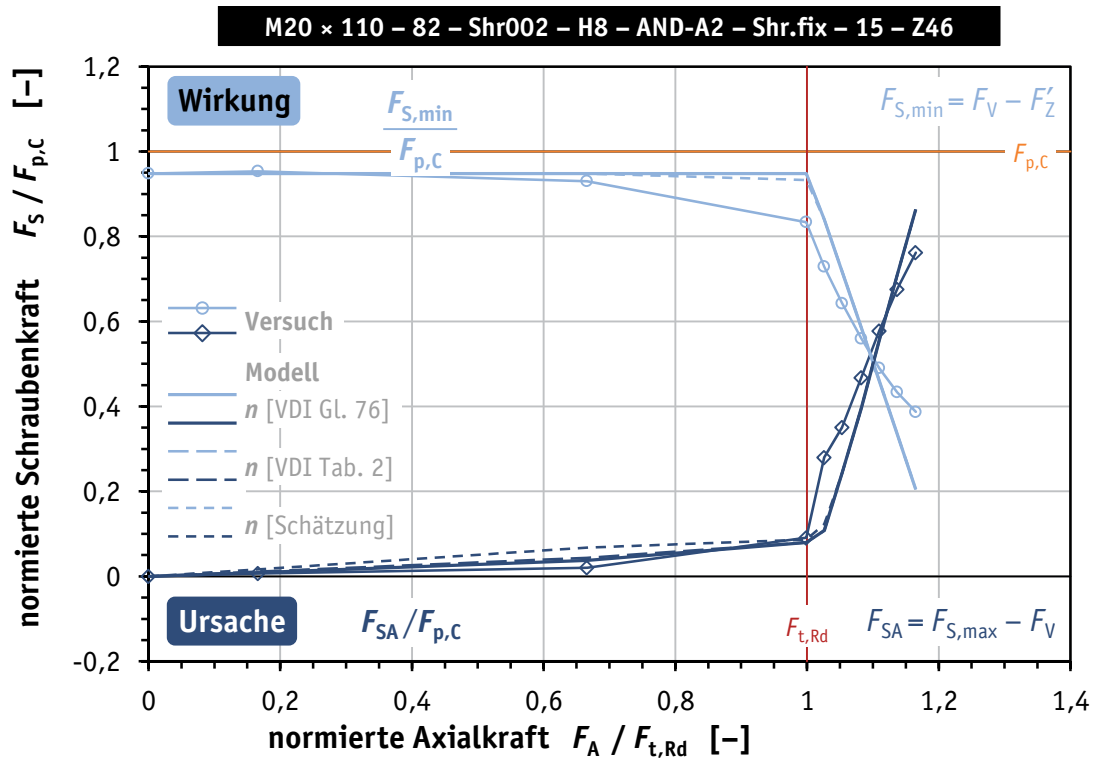
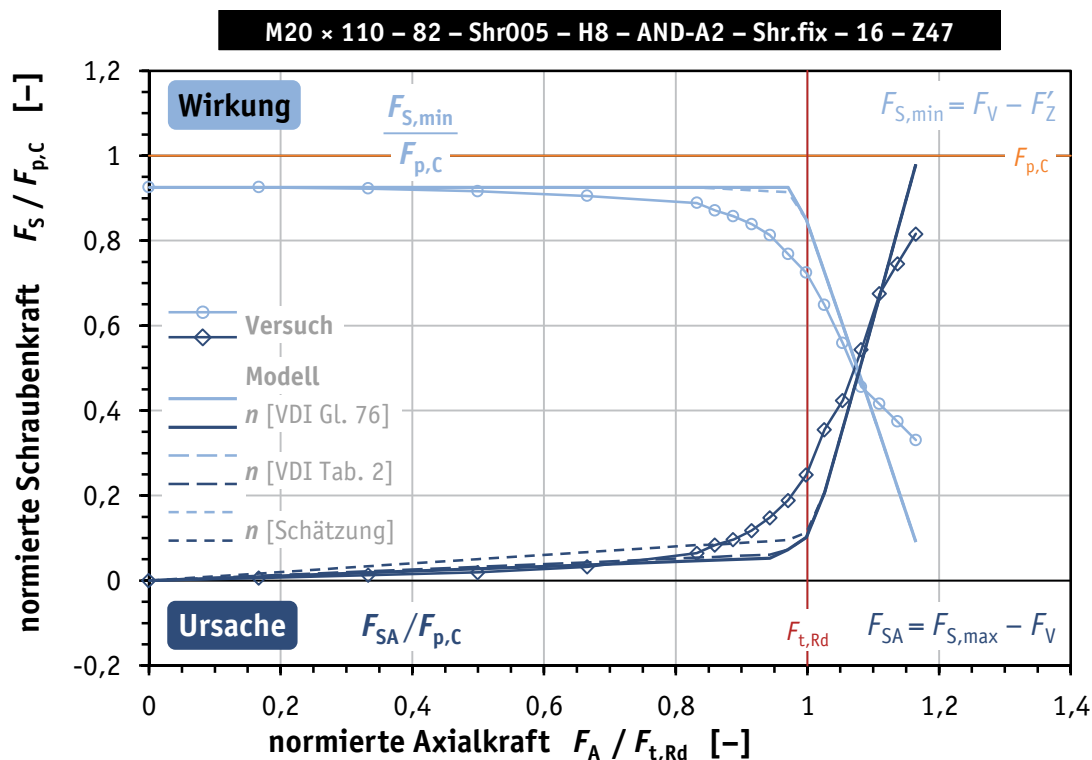


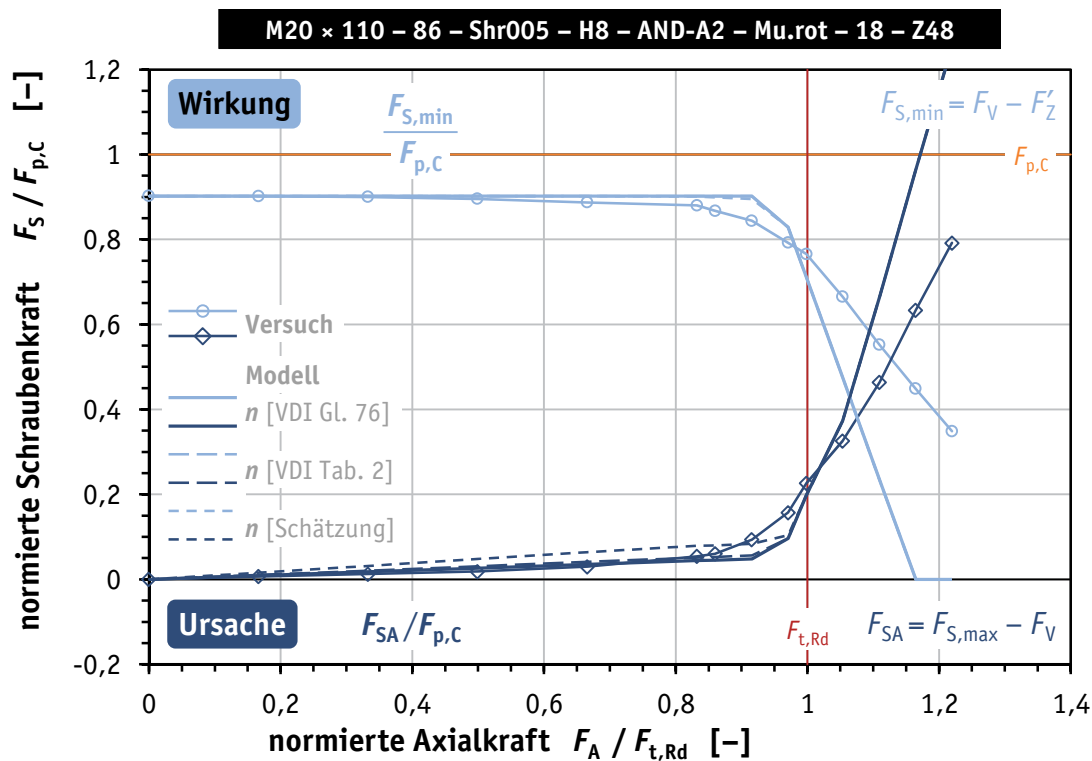
Bild D.52. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z46 (mit DTI)

Figure D.52. Comparison test/model: component tensile test No. Z46 (including DTI)



**Bild D.53.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z47 (mit DTI)

**Figure D.53.** Comparison test/model: component tensile test No. Z47 (including DTI)



**Bild D.54.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z48 (mit DTI)

**Figure D.54.** Comparison test/model: component tensile test No. Z48 (including DTI)



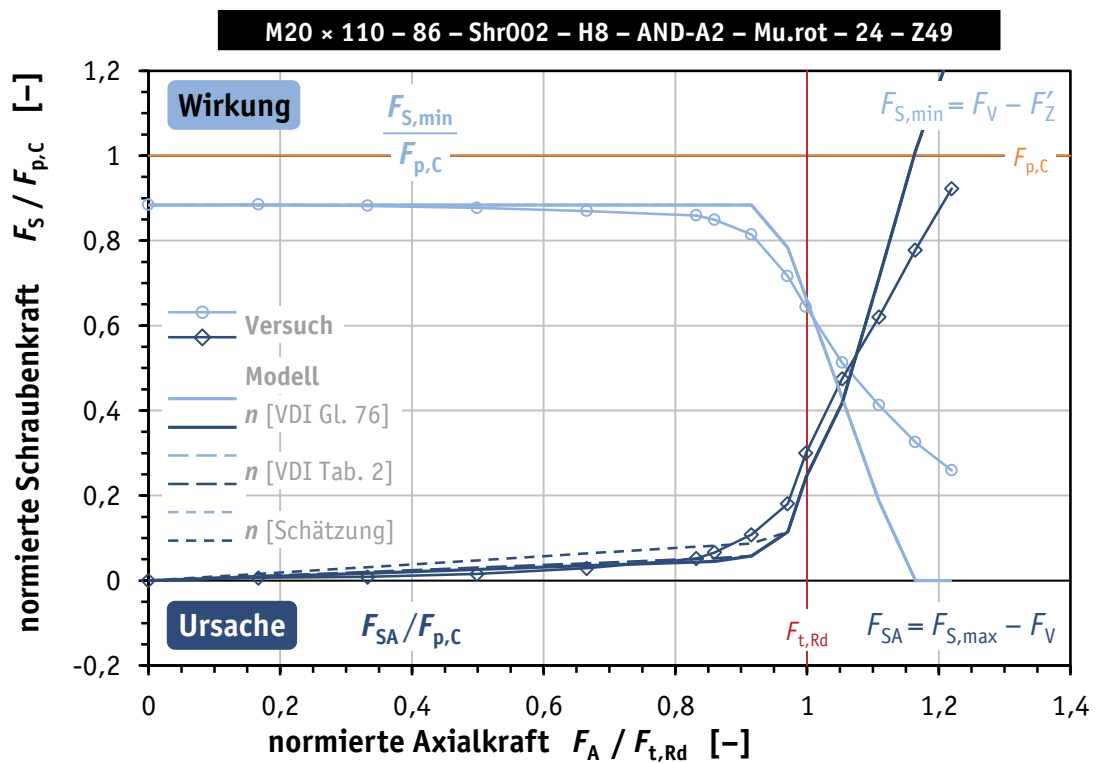


Bild D.55. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z49 (mit DTI)

Figure D.55. Comparison test/model: component tensile test No. Z49 (including DTI)

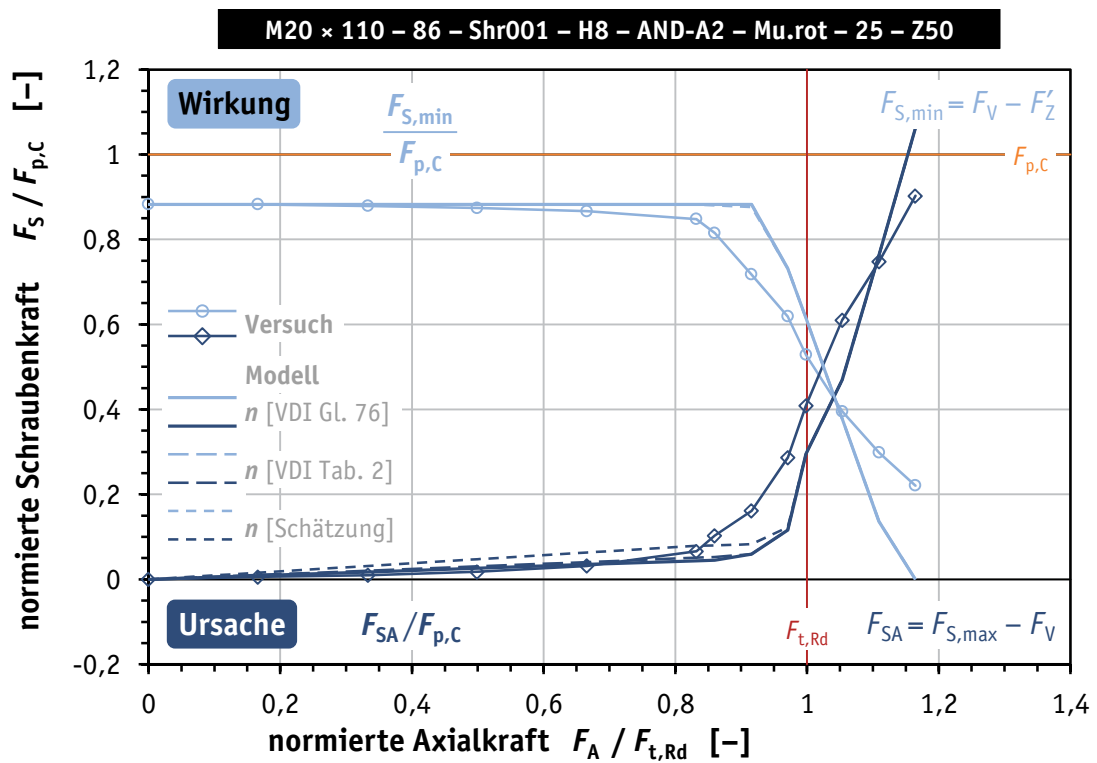
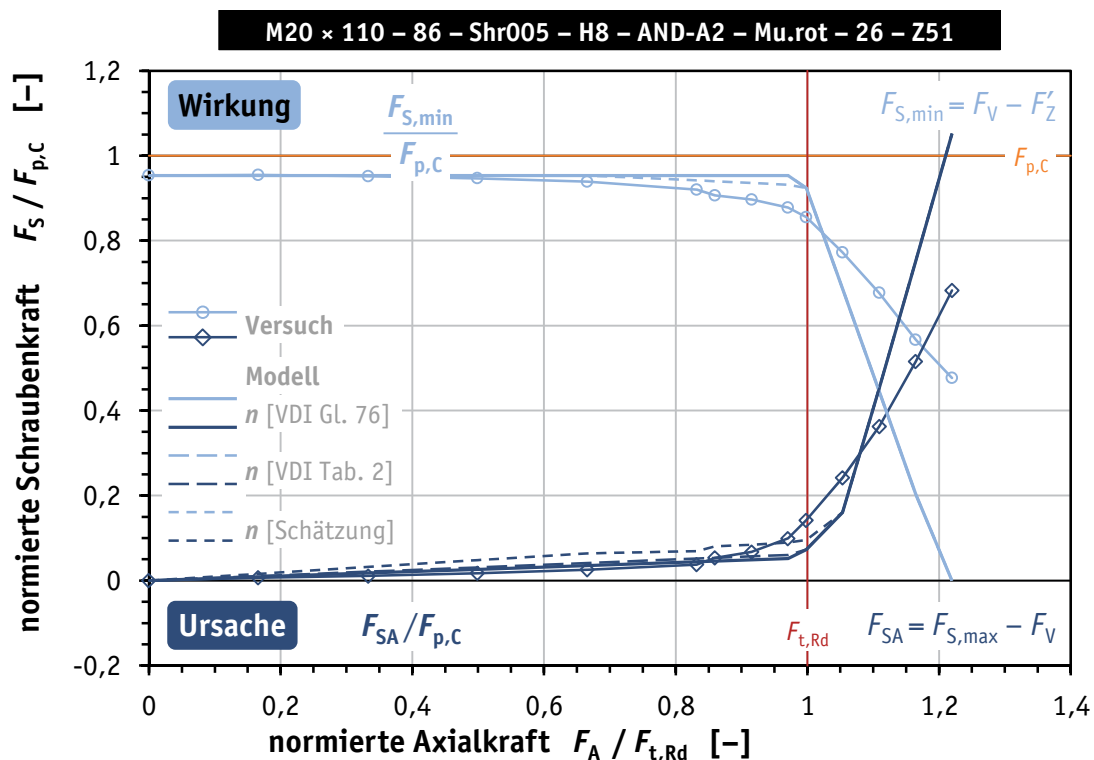


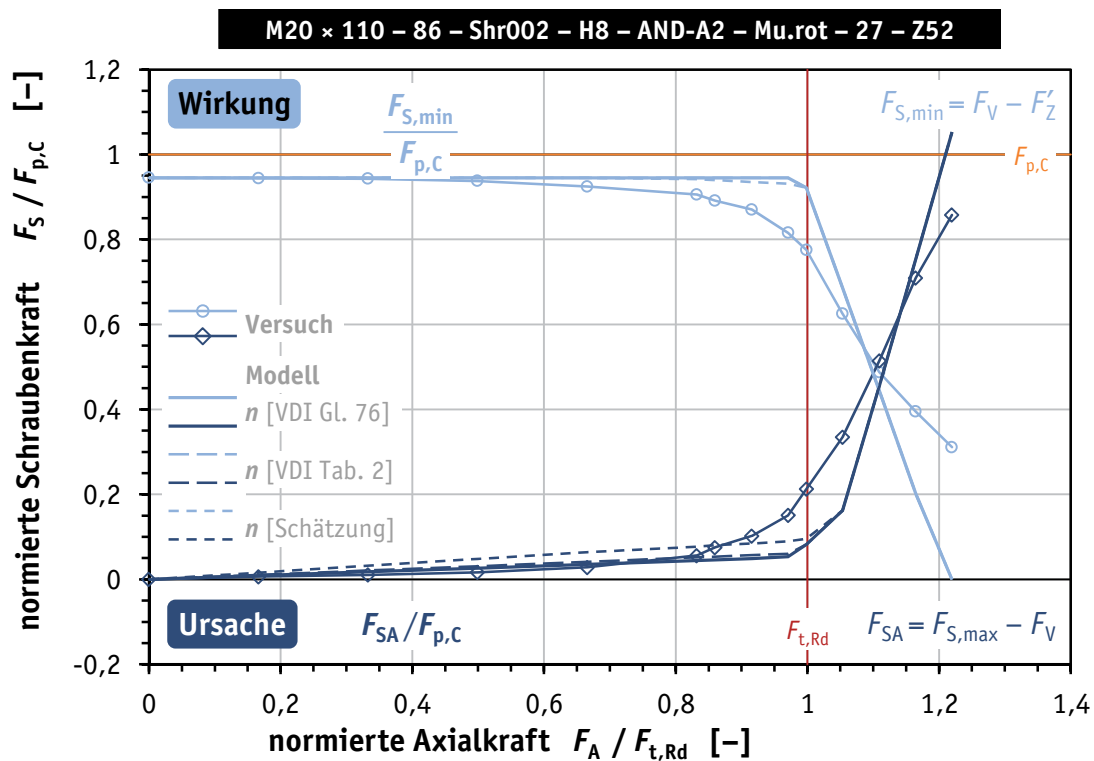
Bild D.56. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z50 (mit DTI)

Figure D.56. Comparison test/model: component tensile test No. Z50 (including DTI)



**Bild D.57.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z51 (mit DTI)

**Figure D.57.** Comparison test/model: component tensile test No. Z51 (including DTI)



**Bild D.58.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z52 (mit DTI)

**Figure D.58.** Comparison test/model: component tensile test No. Z52 (including DTI)

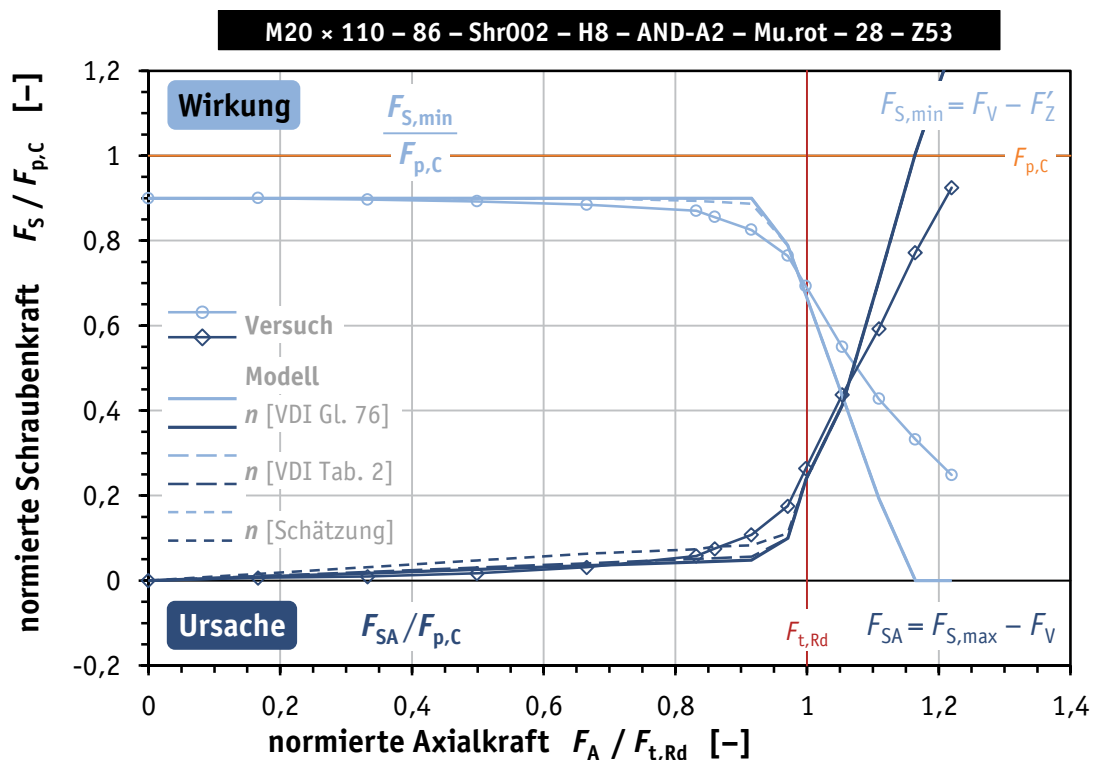


Bild D.59. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z53 (mit DTI)

Figure D.59. Comparison test/model: component tensile test No. Z53 (including DTI)

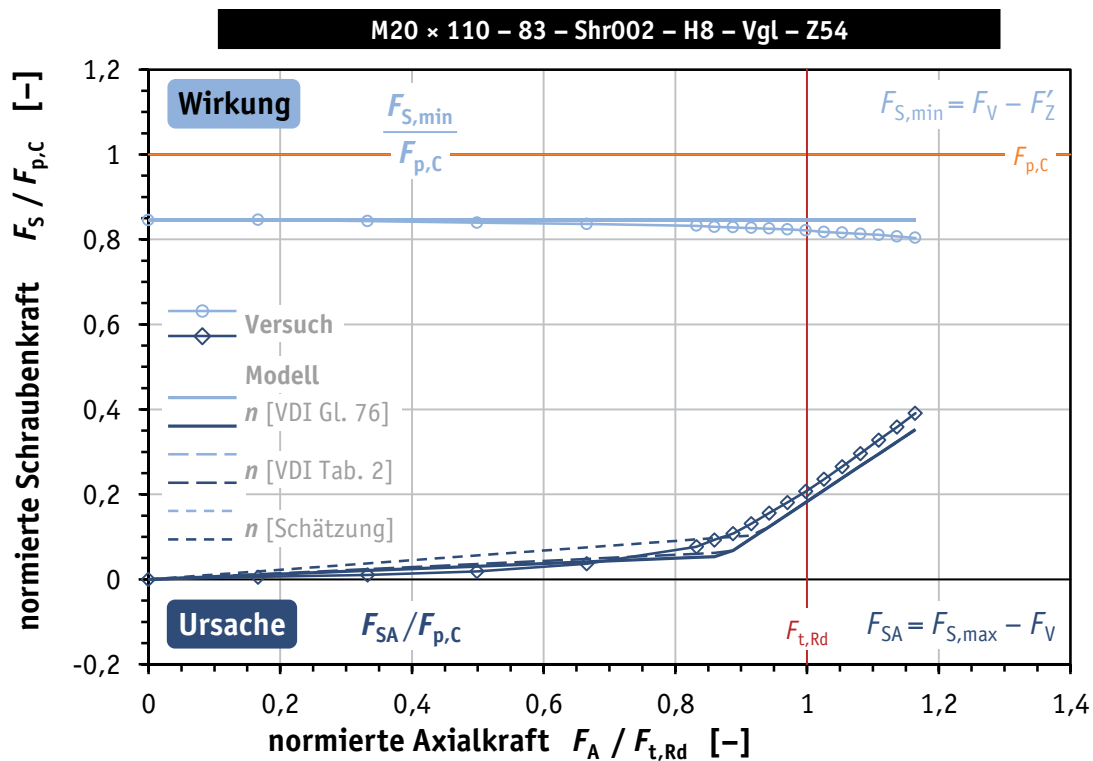
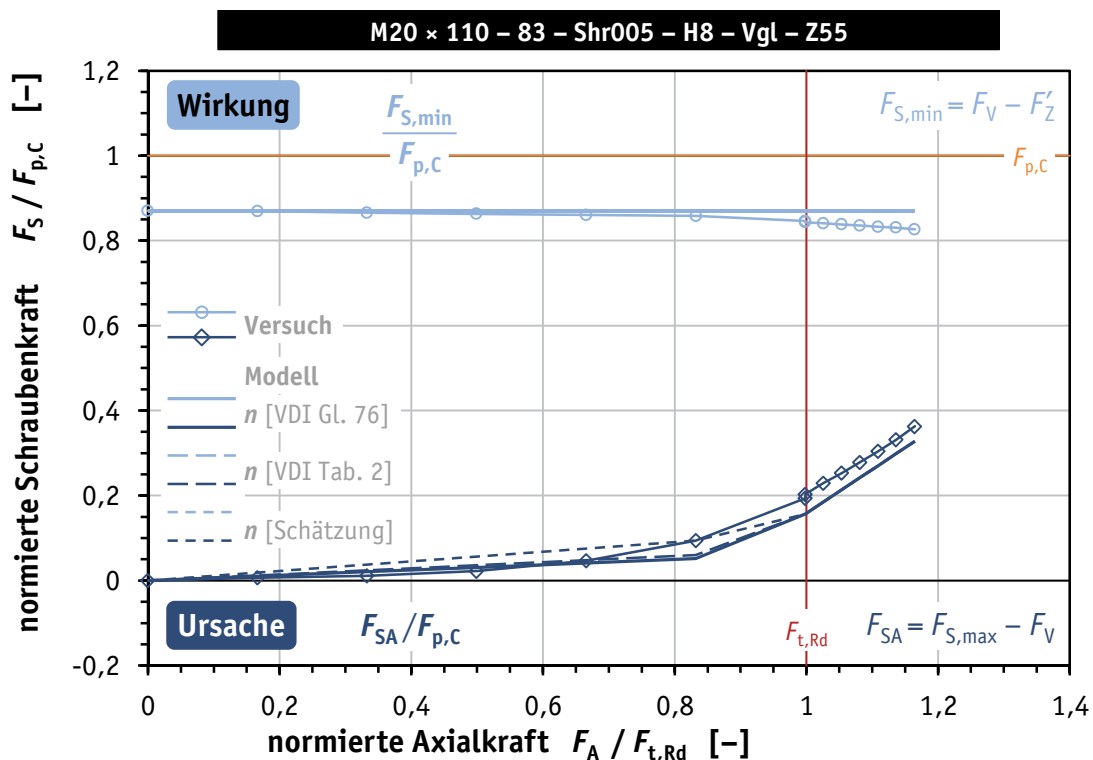


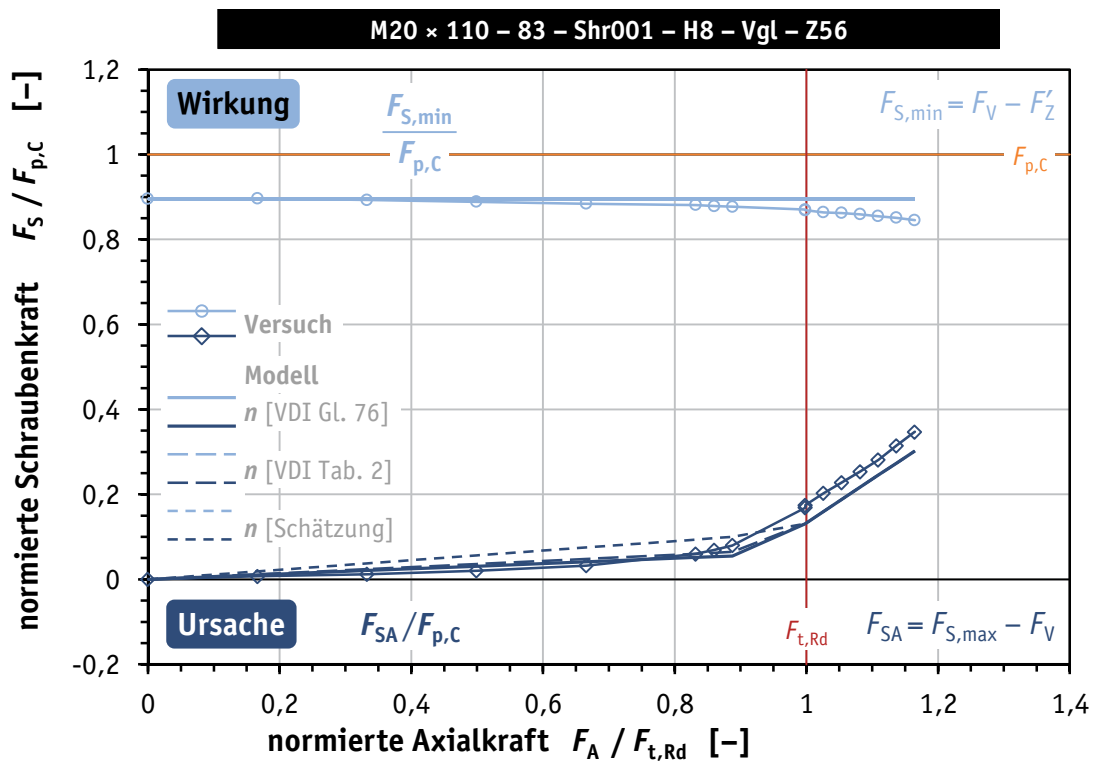
Bild D.60. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z54 (ohne DTI)

Figure D.60. Comparison test/model: component tensile test No. Z54 (without DTI)



**Bild D.61.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z55 (ohne DTI)

**Figure D.61.** Comparison test/model: component tensile test No. Z55 (without DTI)



**Bild D.62.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z56 (ohne DTI)

**Figure D.62.** Comparison test/model: component tensile test No. Z56 (without DTI)

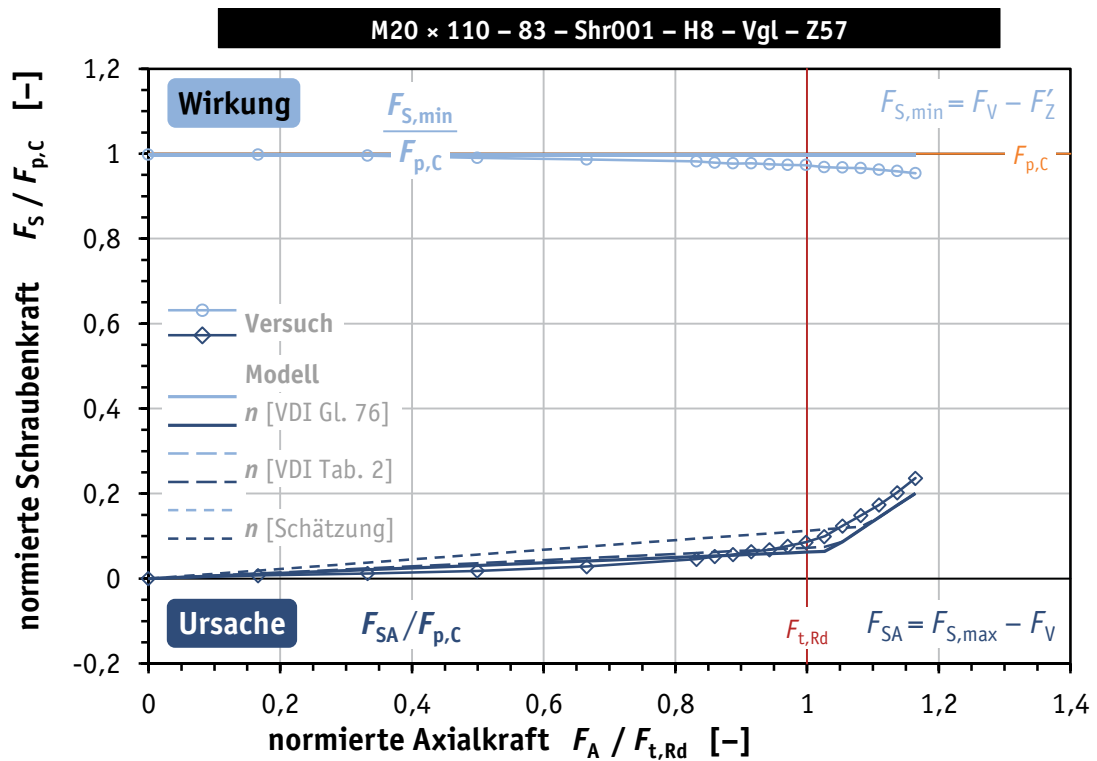


Bild D.63. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z57 (ohne DTI)

Figure D.63. Comparison test/model: component tensile test No. Z57 (without DTI)

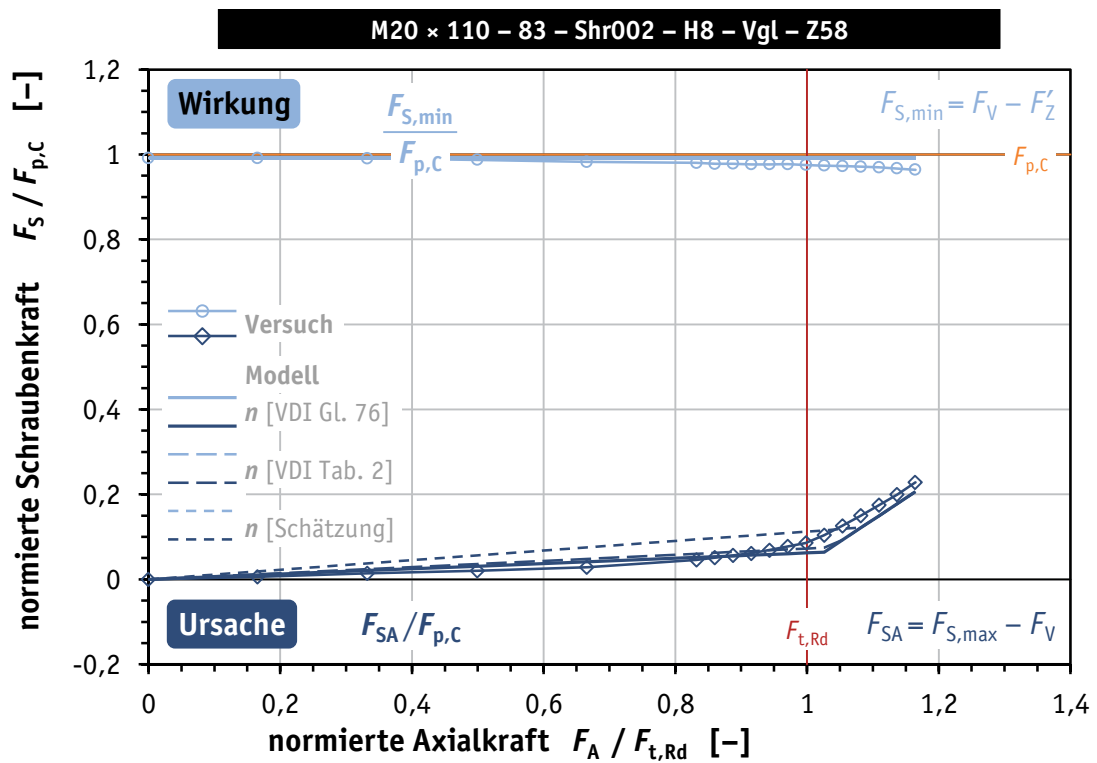
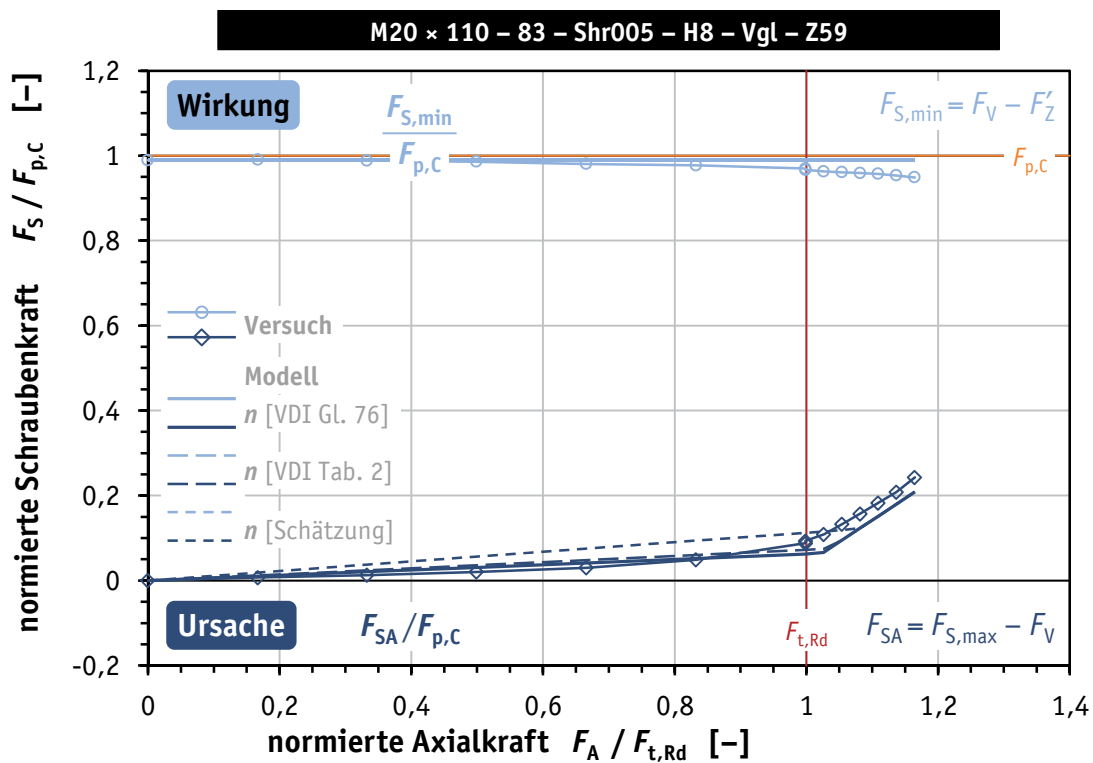


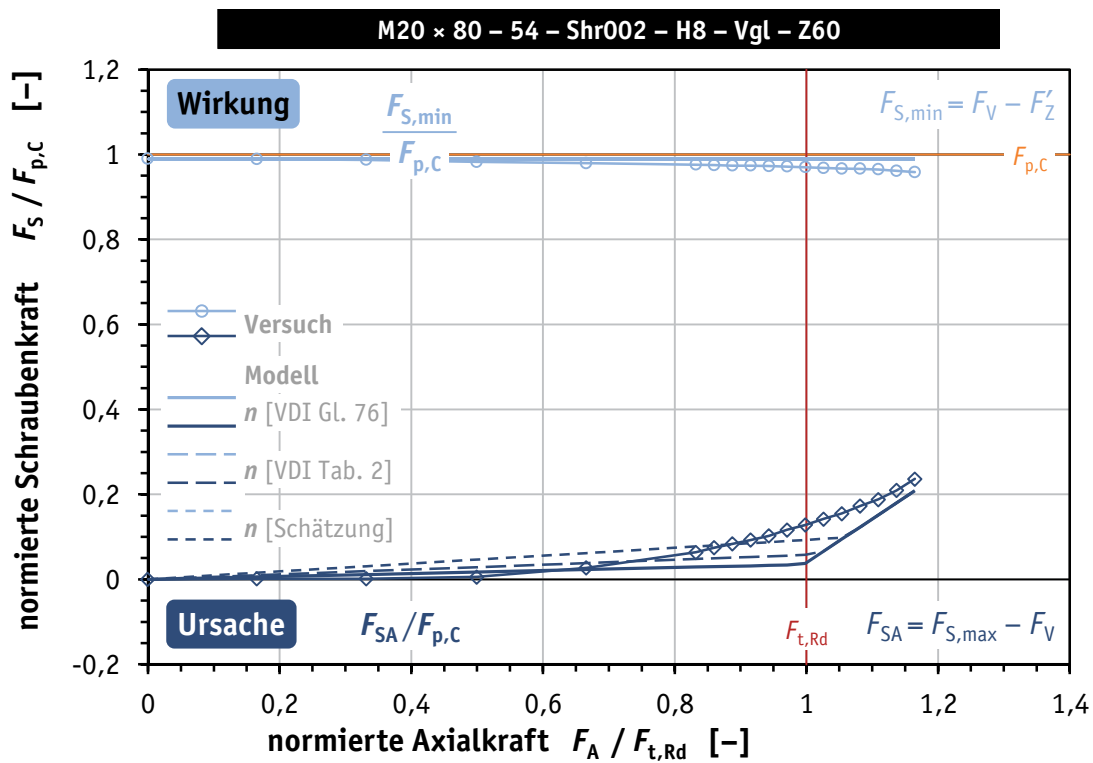
Bild D.64. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z58 (ohne DTI)

Figure D.64. Comparison test/model: component tensile test No. Z58 (without DTI)



**Bild D.65.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z59 (ohne DTI)

**Figure D.65.** Comparison test/model: component tensile test No. Z59 (without DTI)



**Bild D.66.** Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z60 (ohne DTI)

**Figure D.66.** Comparison test/model: component tensile test No. Z60 (without DTI)

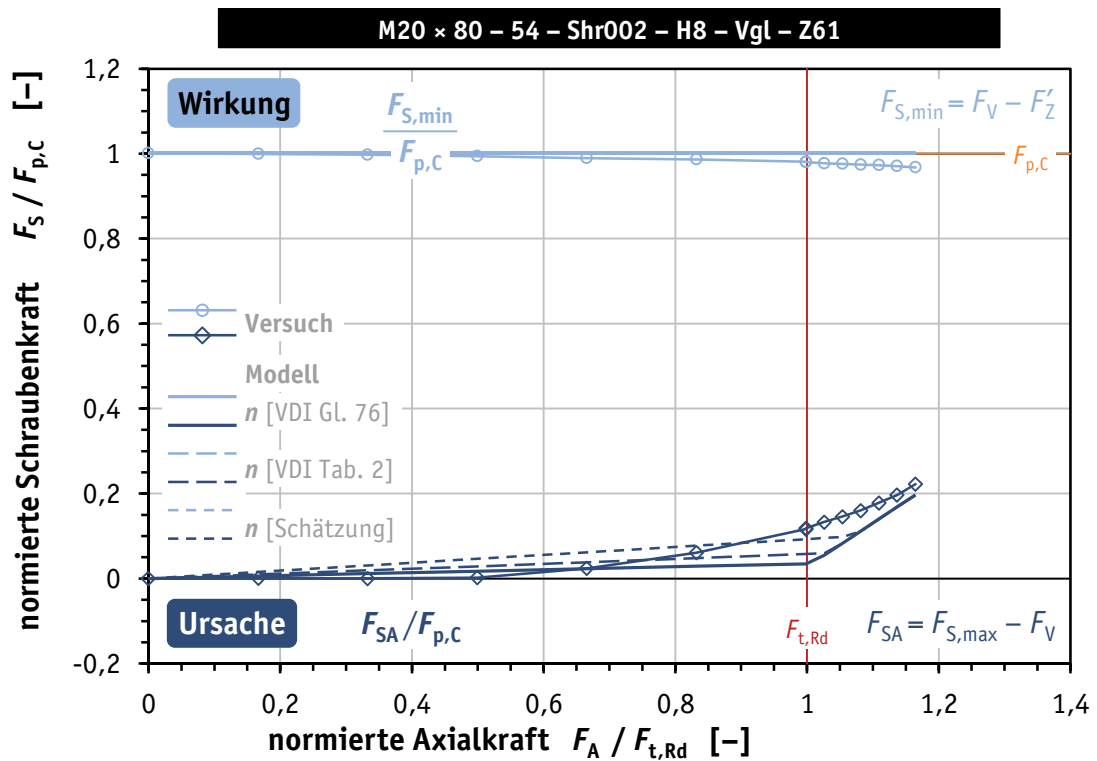


Bild D.67. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z61 (ohne DTI)

Figure D.67. Comparison test/model: component tensile test No. Z61 (without DTI)

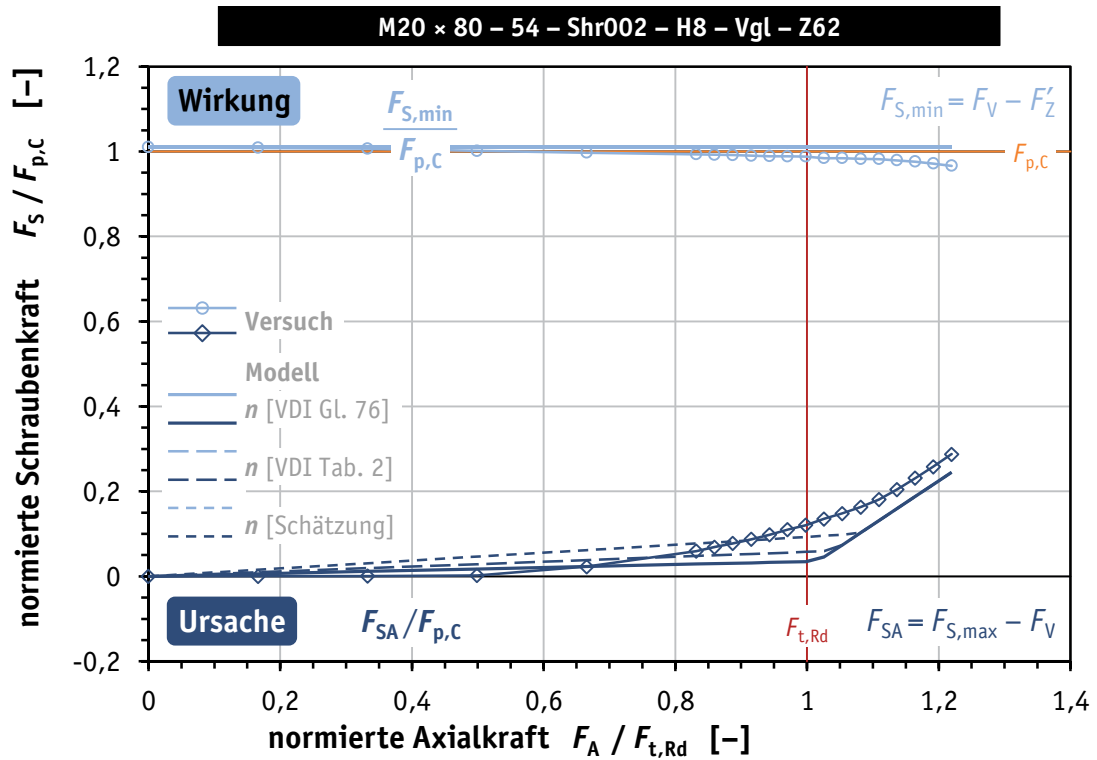
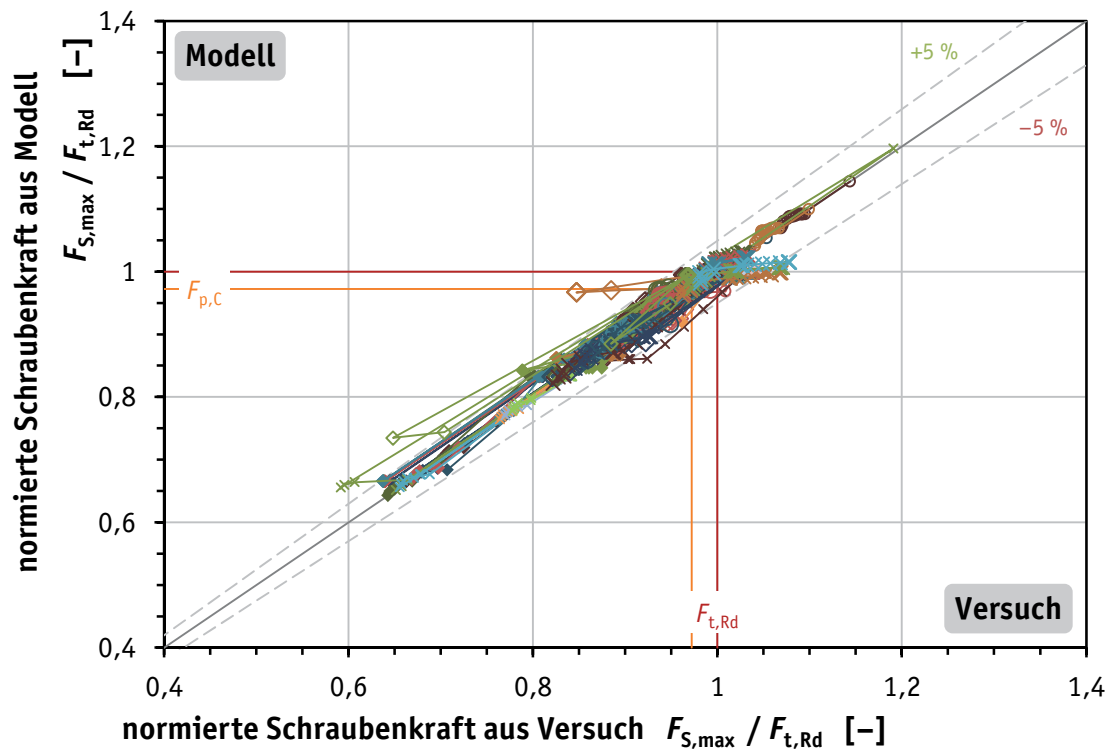


Bild D.68. Vergleich Versuch/Modell: Bauteil-Zugversuch Nr. Z62 (ohne DTI)

Figure D.68. Comparison test/model: component tensile test No. Z62 (without DTI)

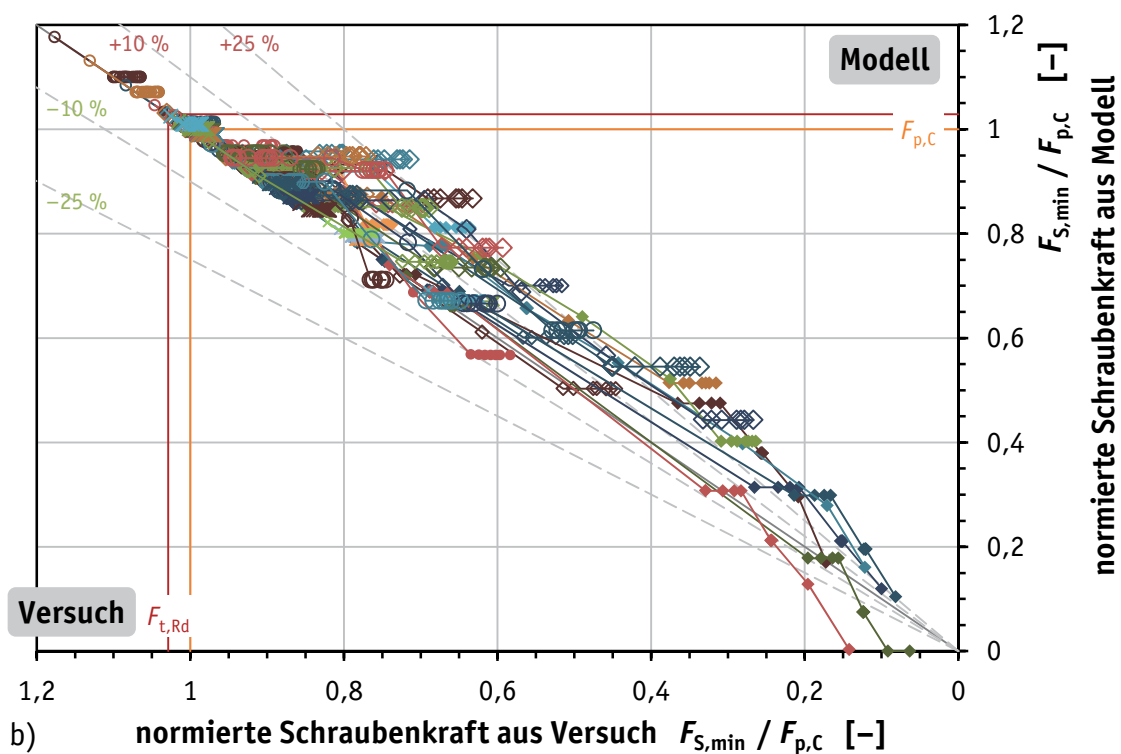
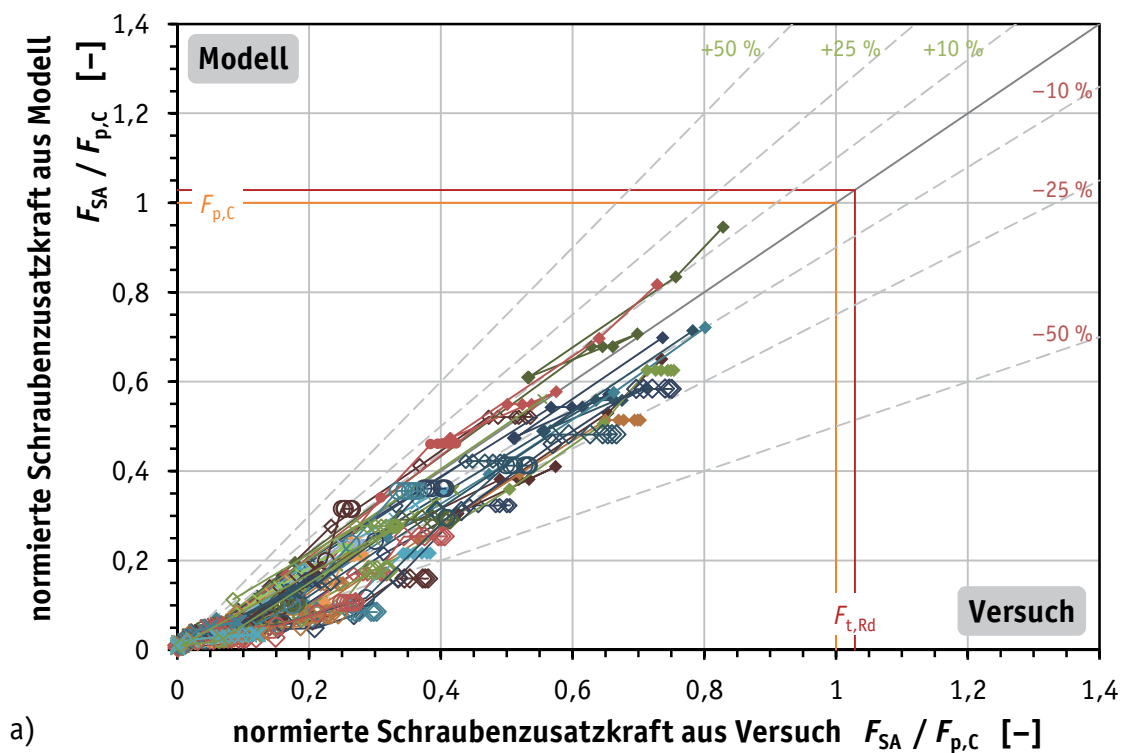
## D.7 Streudiagramme für Versuch und Modell



**Bild D.69.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für alle Prüfungen mit  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

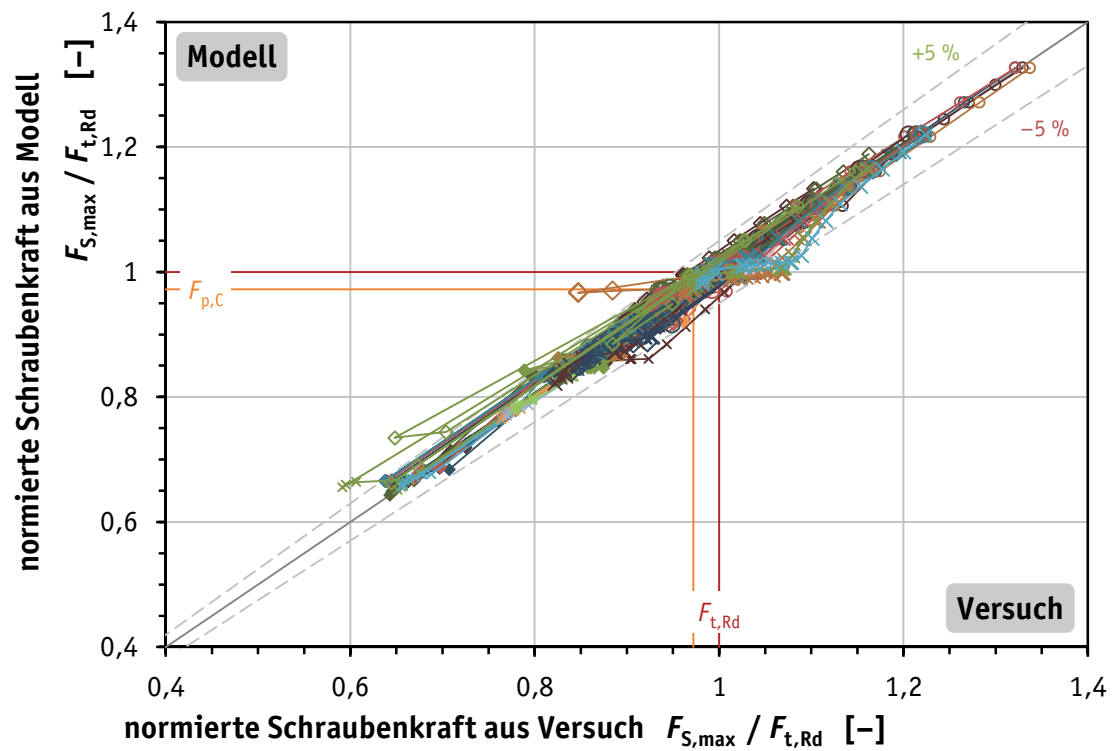
**Figure D.69.** Scatterplot of the normalised bolt loads for all tests with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximum bolt load  $F_{S,max}$





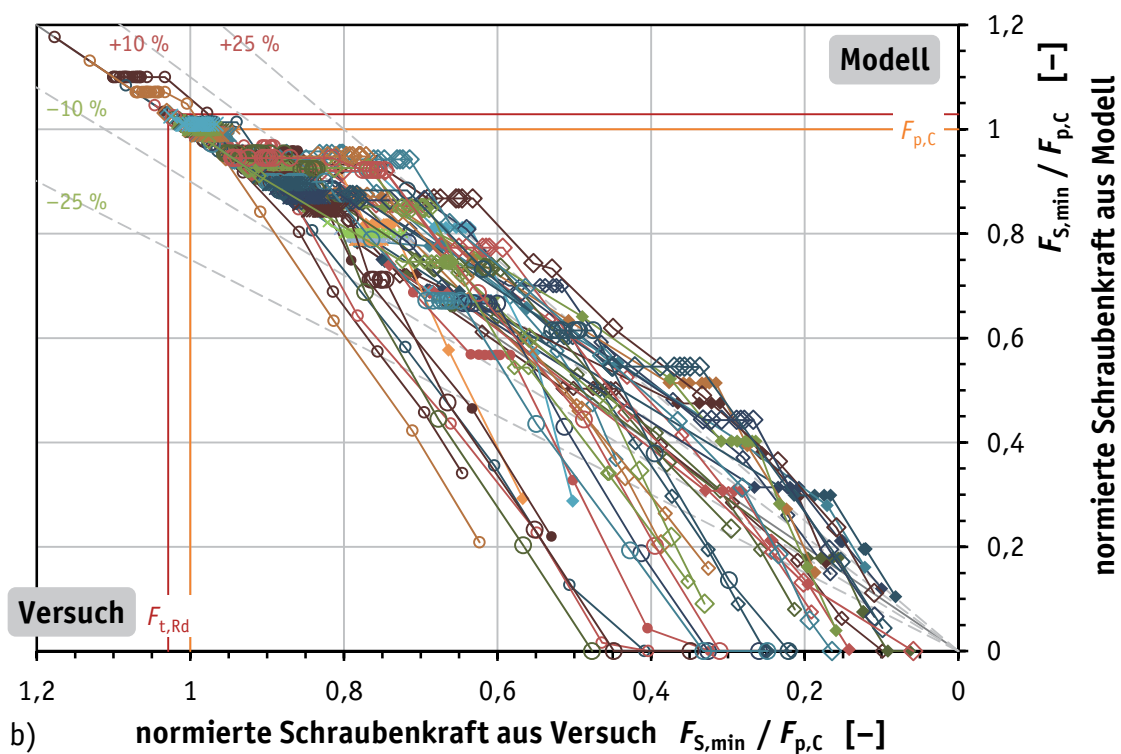
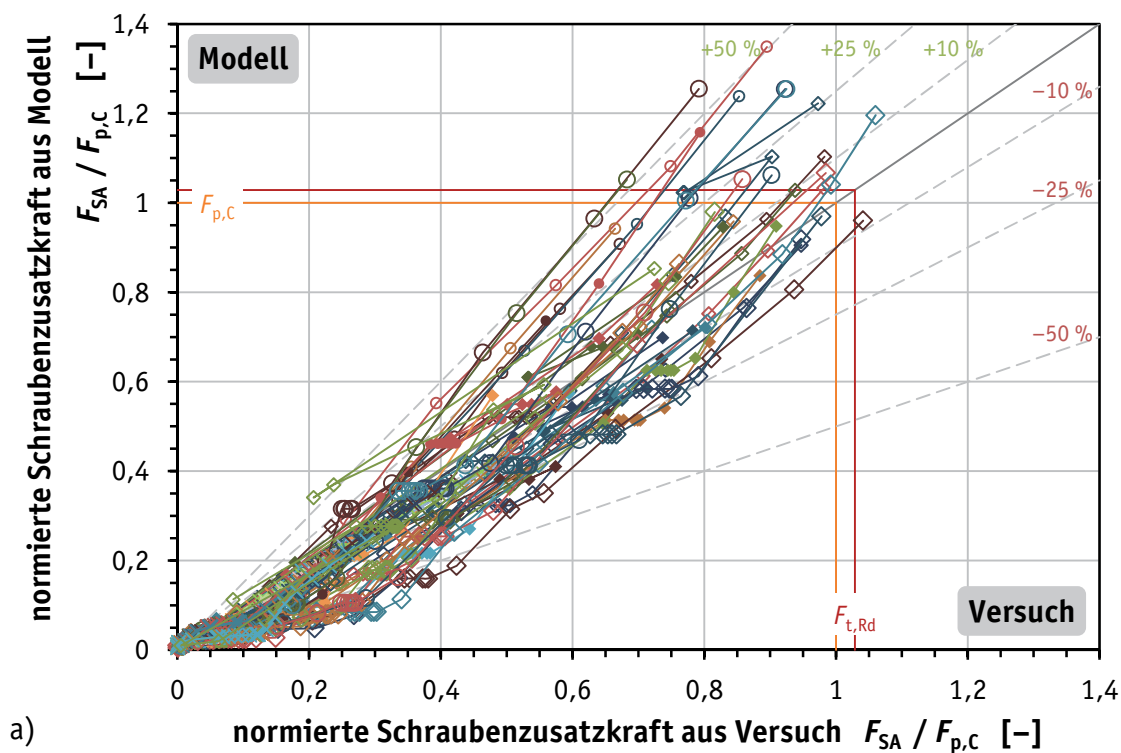
**Bild D.70.** Streudiagramme der Schraubenkräfte für alle Prüfungen mit  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normierte Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft  $F_{S,min}$

**Figure D.70.** Scatterplots of the bolt loads for all tests with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normalised additional bolt load  $F_{SA}$ , (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$



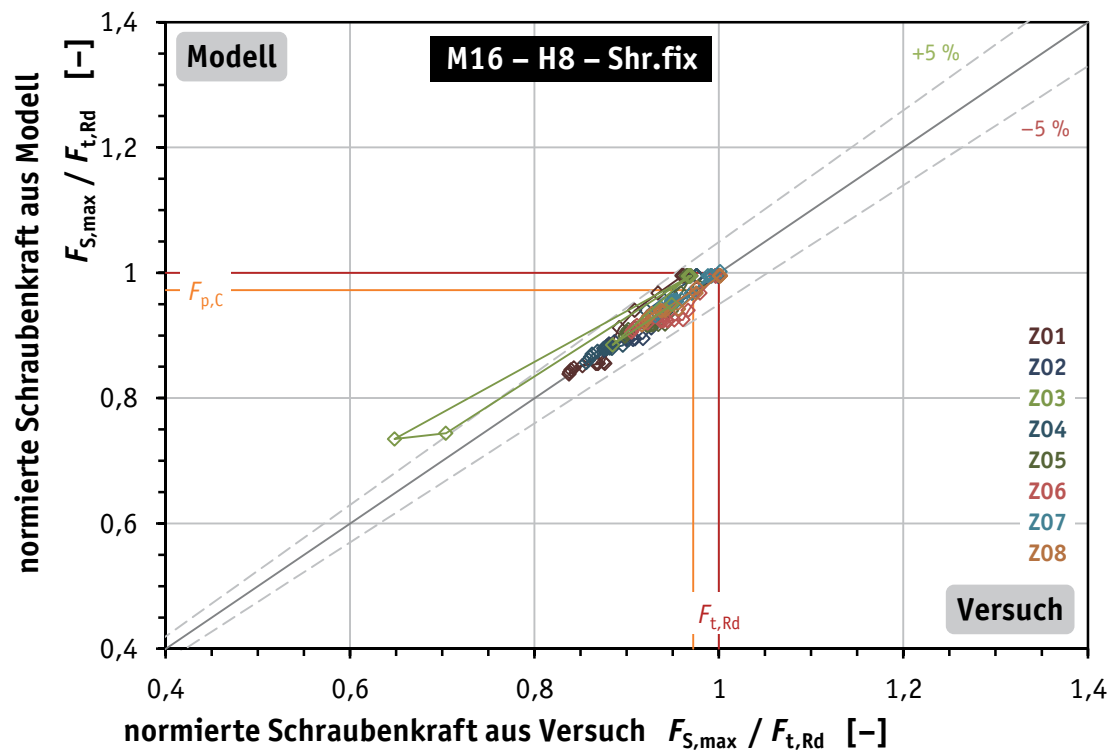
**Bild D.71.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für alle Prüfungen: maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

**Figure D.71.** Scatterplot of the normalised bolt loads for all tests: maximum bolt load  $F_{S,max}$



**Bild D.72.** Streudiagramme der Schraubenkräfte für alle Prüfungen: (a) normierte Schraubenzusatzkraft  $F_{SAr}$  (b) normierte Restvorspannkraft  $F_{S,min}$

**Figure D.72.** Scatterplots of the bolt loads for all tests: (a) normalised additional bolt load  $F_{SAr}$  (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$

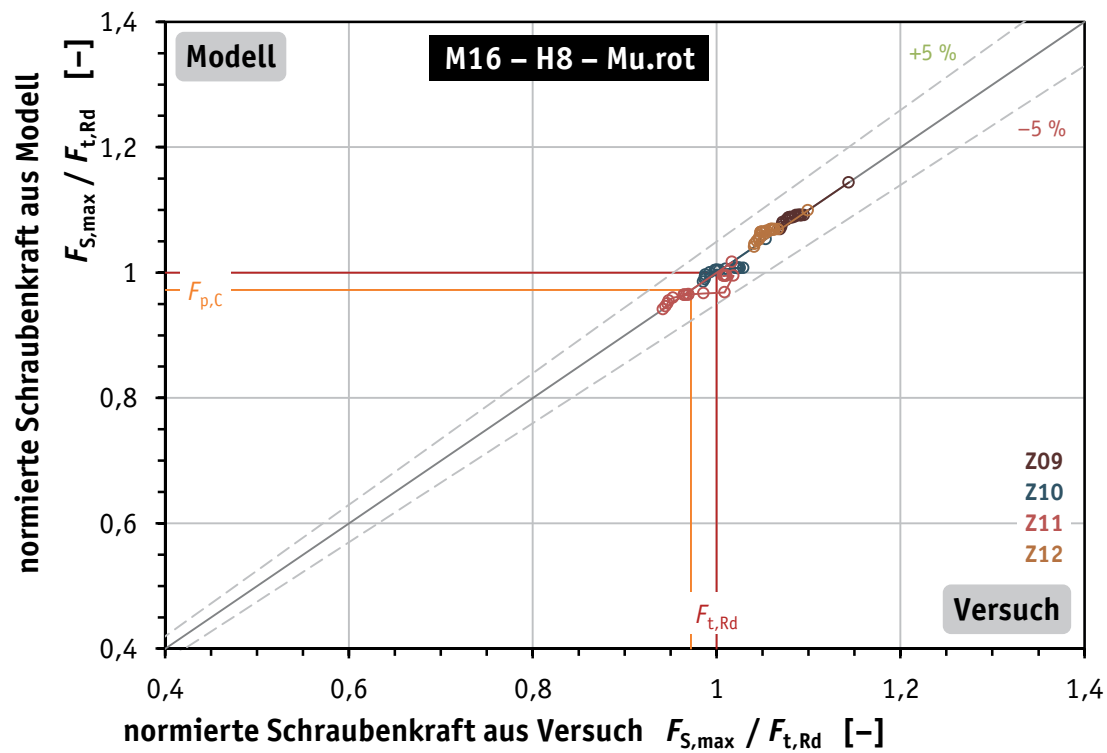


**Bild D.73.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H8 – Shr.fix mit  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

**Figure D.73.** Scatterplot of the normalised bolt loads for M16 – H8 – Shr.fix series with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximum bolt load  $F_{S,max}$

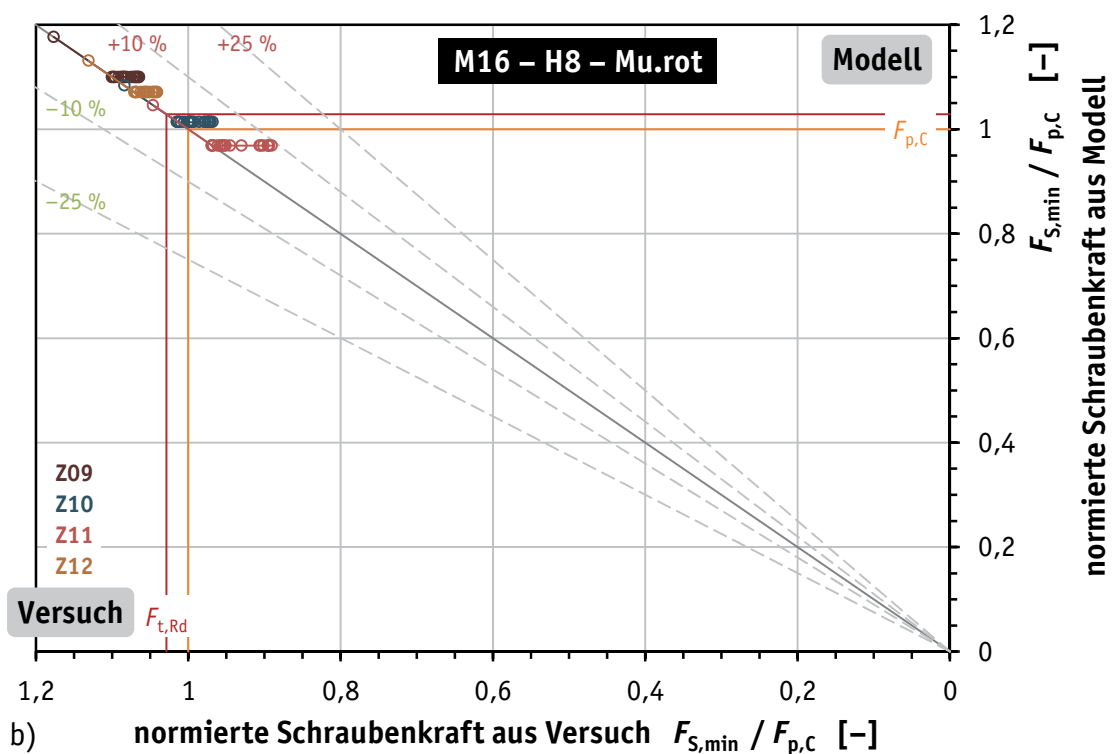
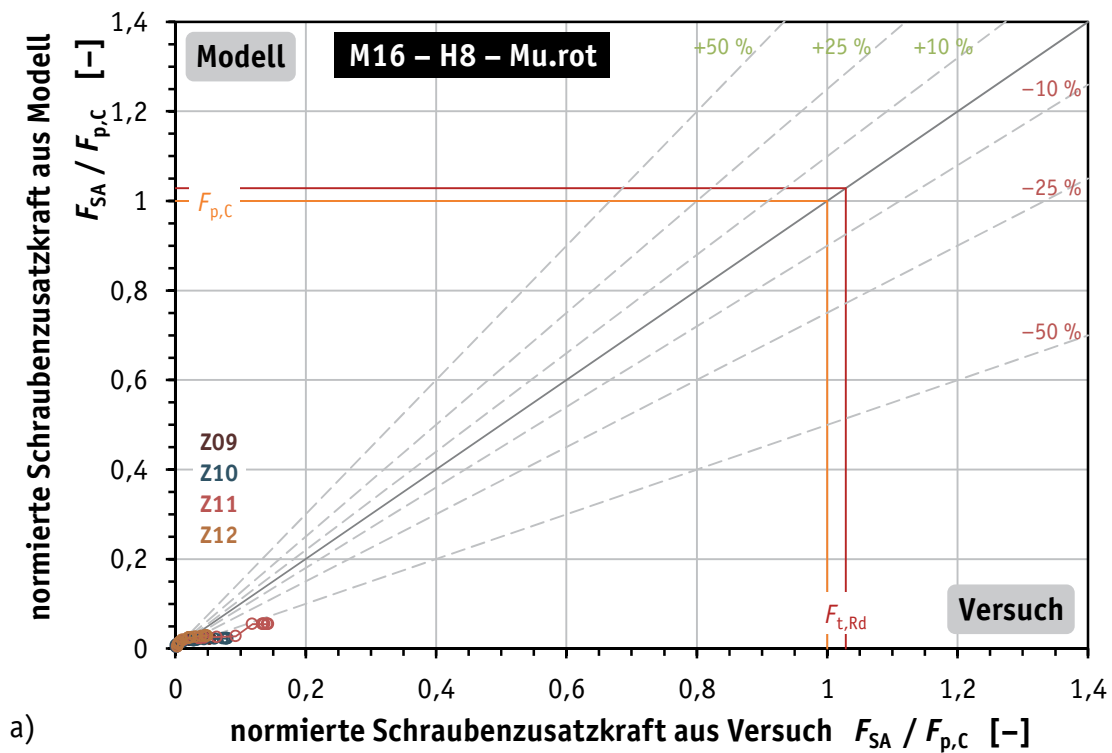


**Figure D.74.** Scatterplots for M16 – H8 – Shr.fix series with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normalised additional bolt load  $F_{SA,r}$ , (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$



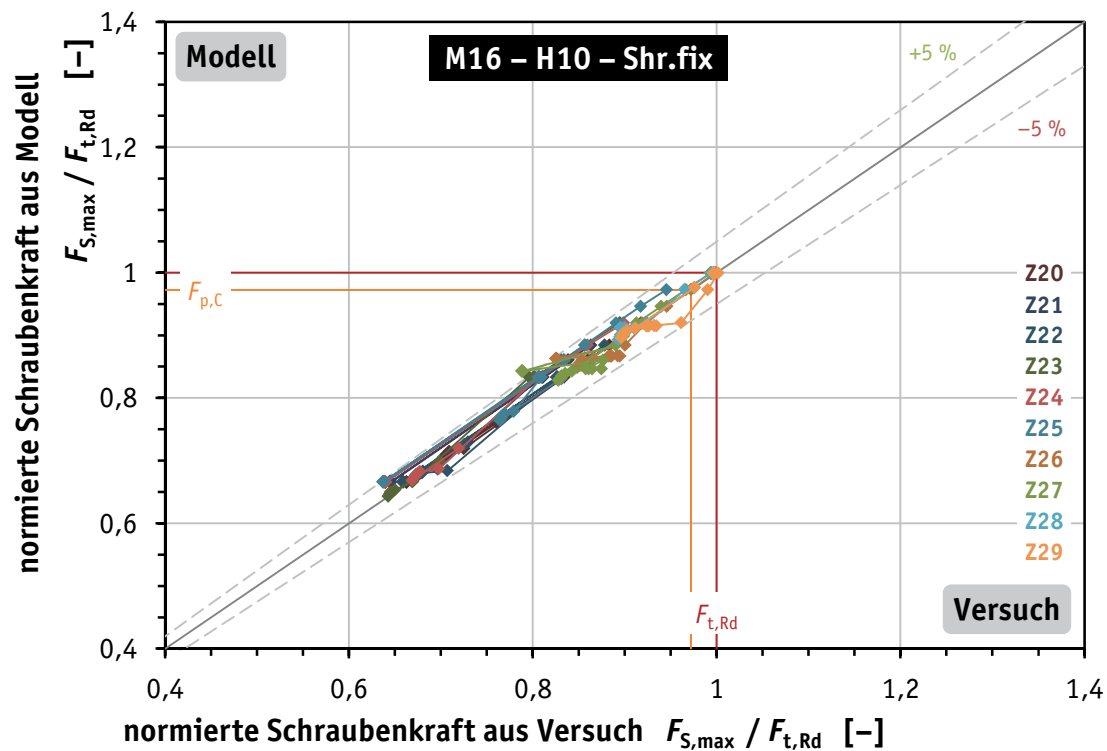
**Bild D.75.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H8 – Mu.rot mit  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

**Figure D.75.** Scatterplot of the normalised bolt loads for M16 – H8 – Mu.rot series with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximum bolt load  $F_{S,max}$



**Bild D.76.** Streudiagramme für Serie M16 – H8 – Mu.rot mit  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normierte Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft  $F_{S,min}$

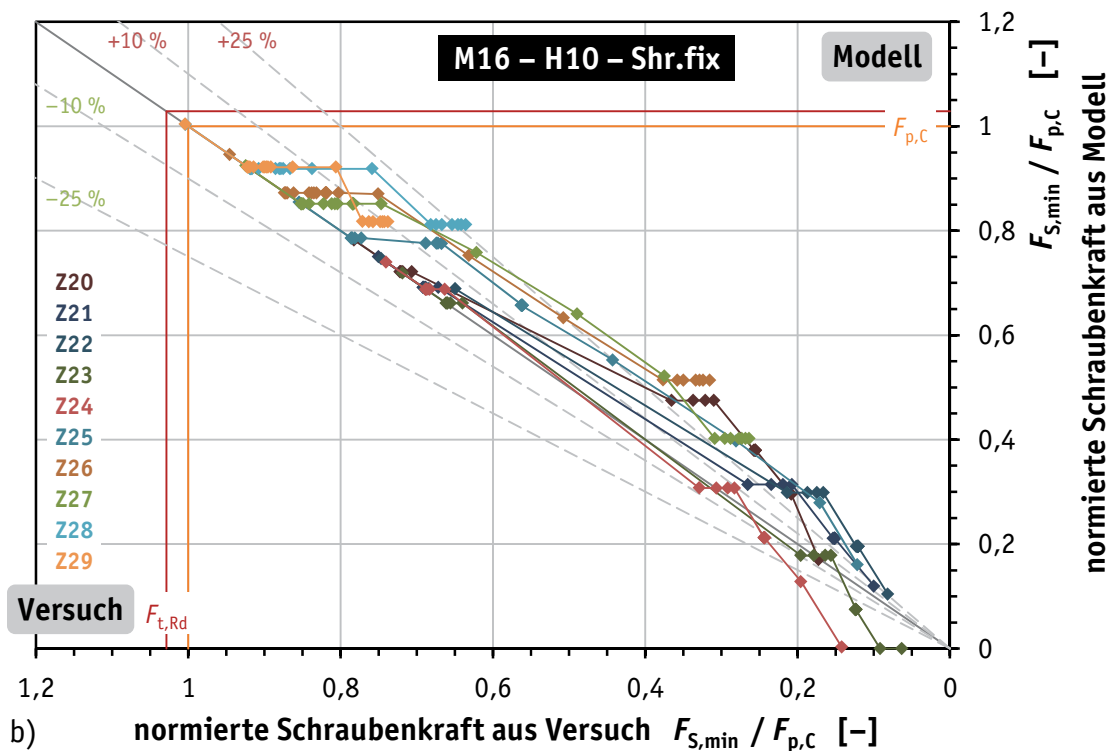
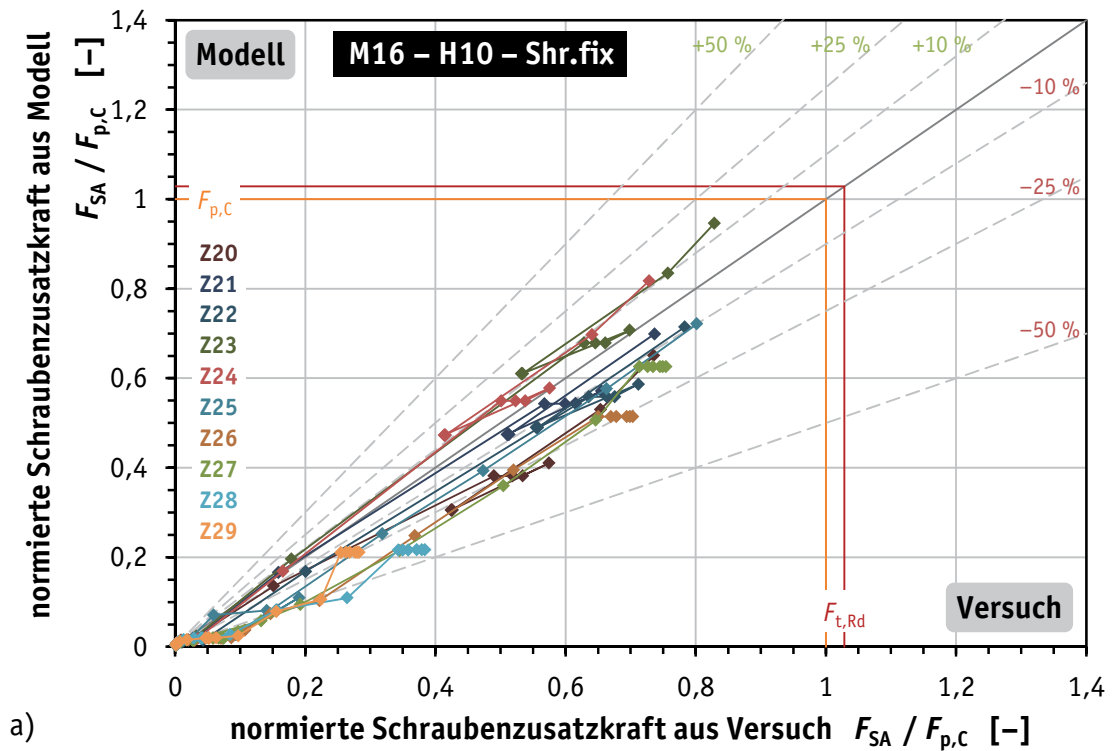
**Figure D.76.** Scatterplots for M16 – H8 – Mu.rot series with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normalised additional bolt load  $F_{SA,r}$  (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$



**Bild D.77.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H10 – Shr.fix mit  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

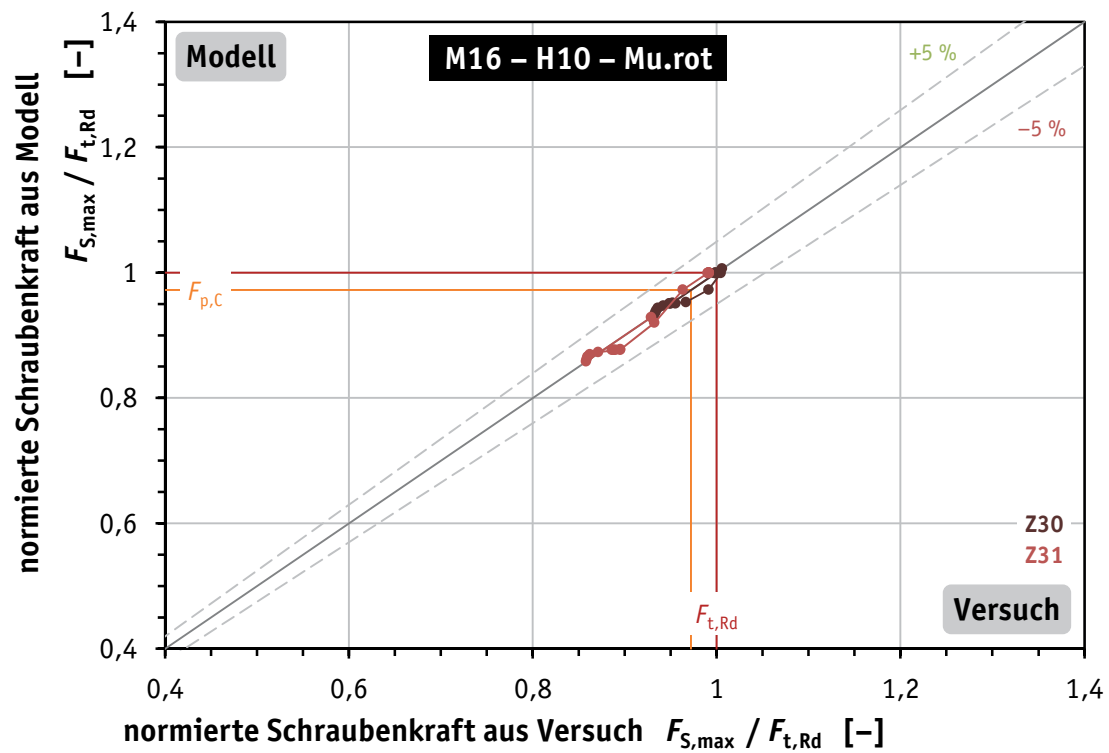
**Figure D.77.** Scatterplot of the normalised bolt loads for M16 – H10 – Shr.fix series with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximum bolt load  $F_{S,max}$





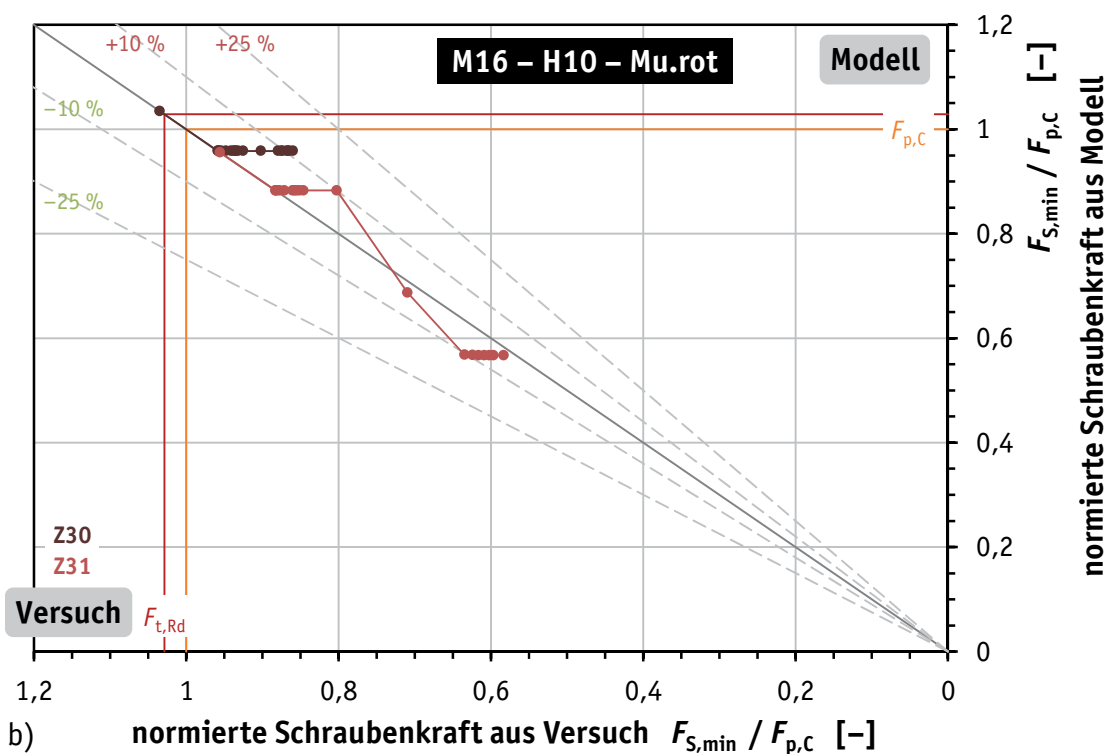
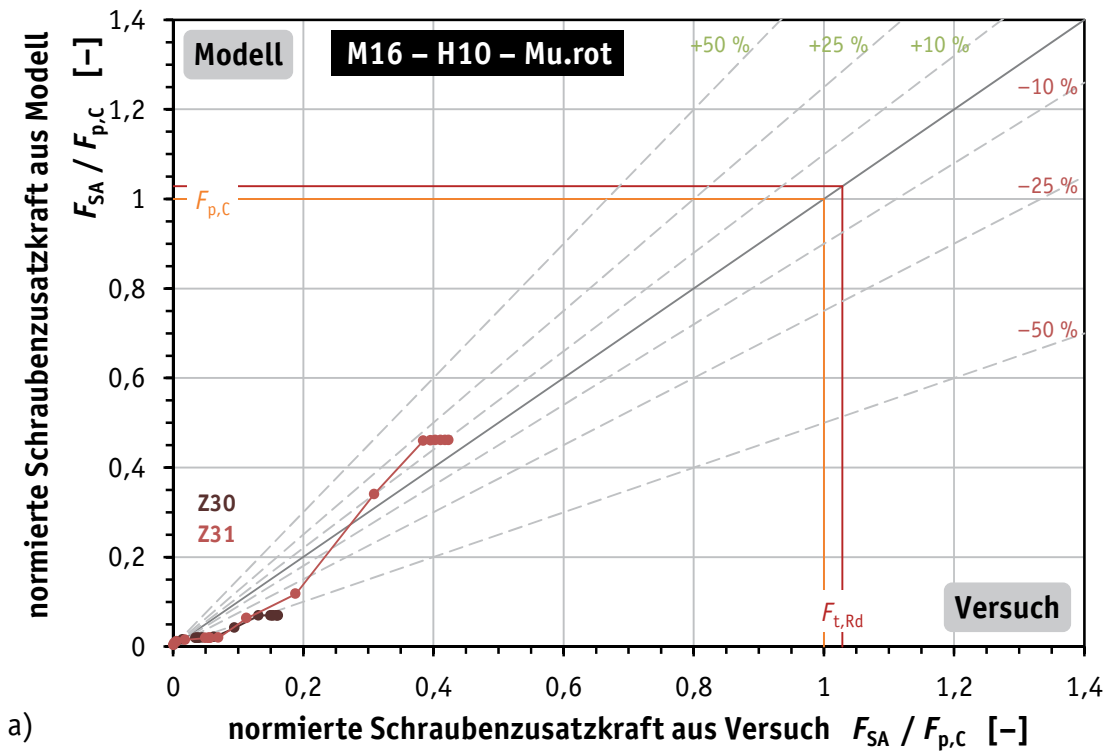
**Bild D.78.** Streudiagramme für Serie M16 – H10 – Shr.fix mit  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normierte Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft  $F_{S,min}$

**Figure D.78.** Scatterplots for M16 – H10 – Shr.fix series with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normalised additional bolt load  $F_{SA}$ , (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$



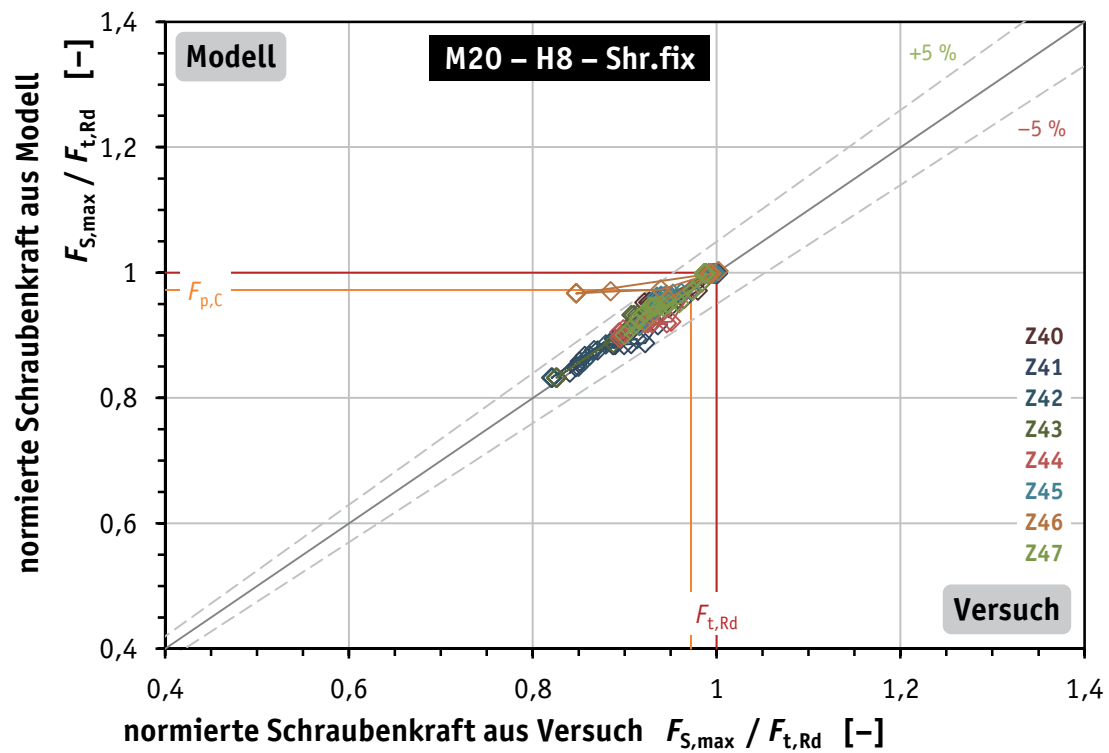
**Bild D.79.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H10 – Mu.rot mit  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

**Figure D.79.** Scatterplot of the normalised bolt loads for M16 – H10 – Mu.rot series with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximum bolt load  $F_{S,max}$



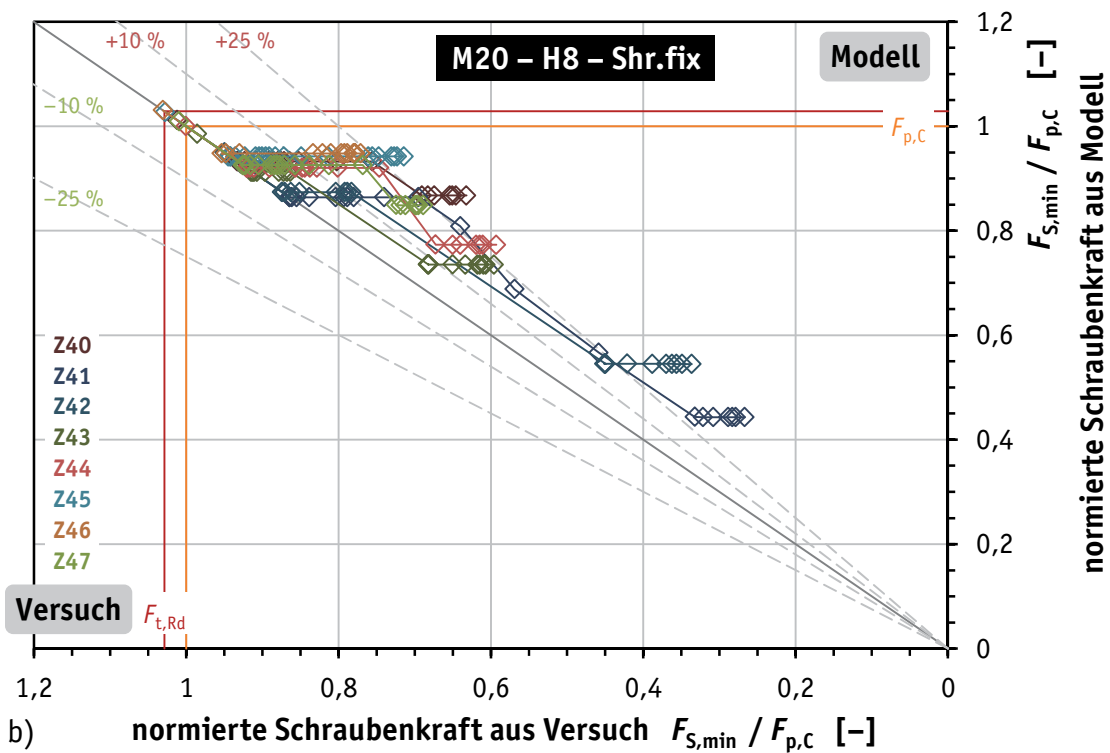
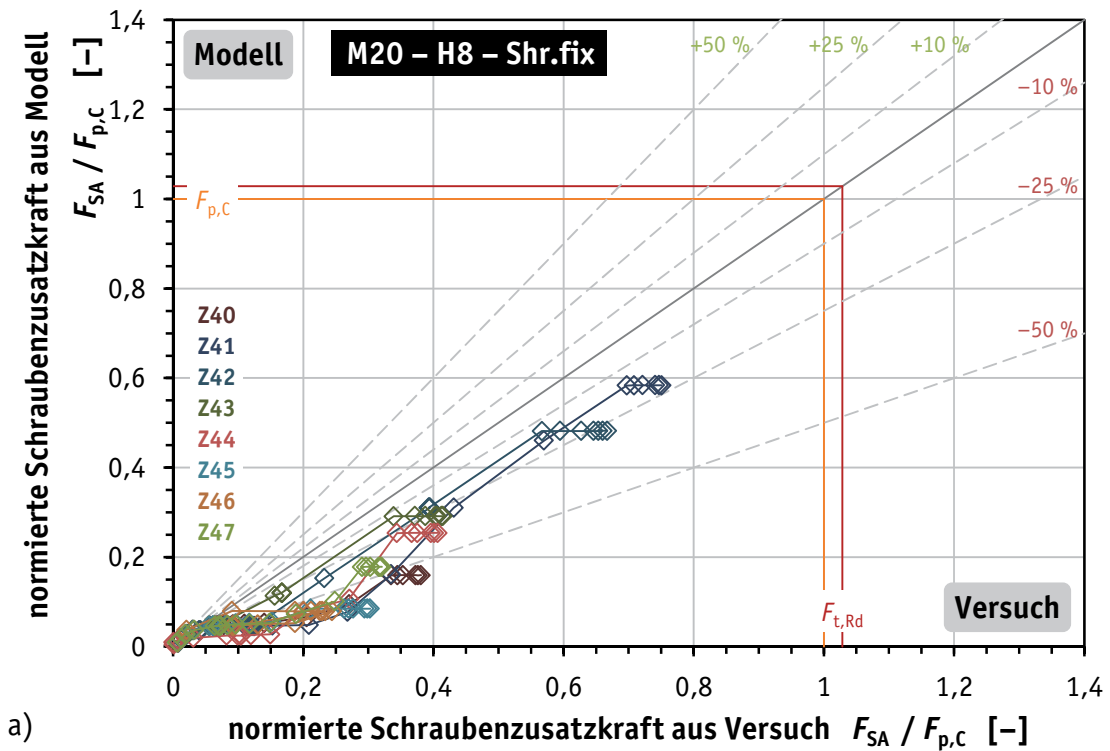
**Bild D.80.** Streudiagramme für Serie M16 – H10 – Mu.rot mit  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normierte Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft  $F_{S,min}$

**Figure D.80.** Scatterplots for M16 – H10 – Mu.rot series with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normalised additional bolt load  $F_{SA}$ , (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$



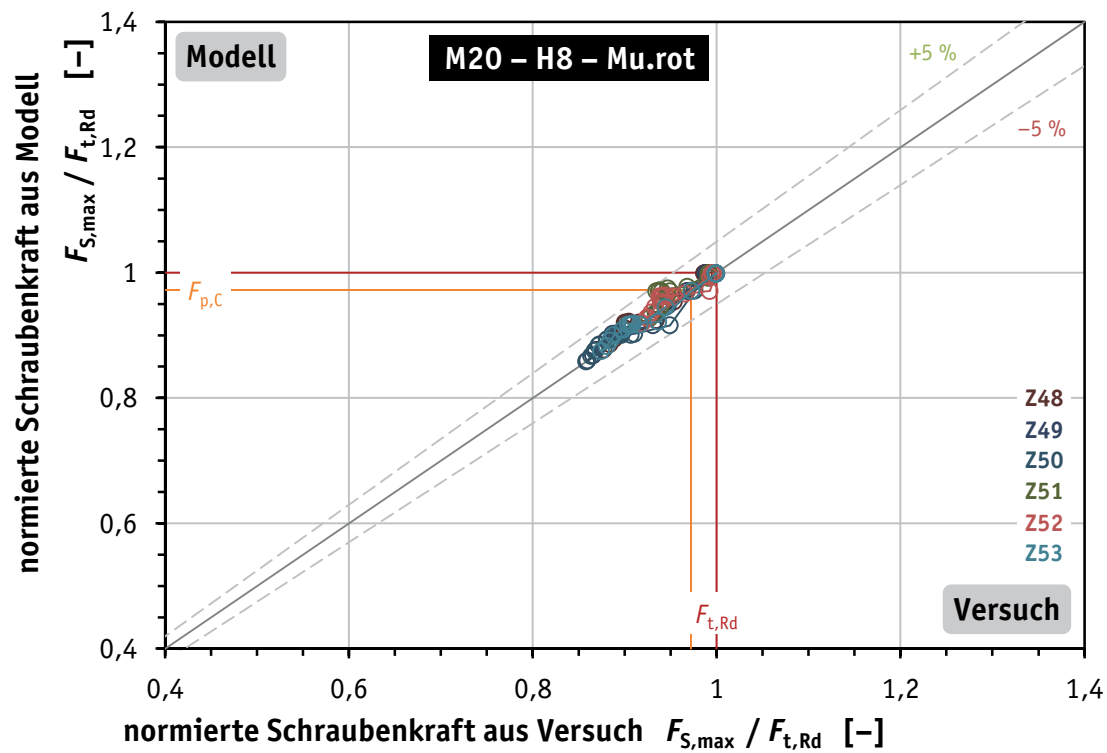
**Bild D.81.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M20 – H8 – Shr.fix mit  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

**Figure D.81.** Scatterplot of the normalised bolt loads for M20 – H8 – Shr.fix series with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximum bolt load  $F_{S,max}$



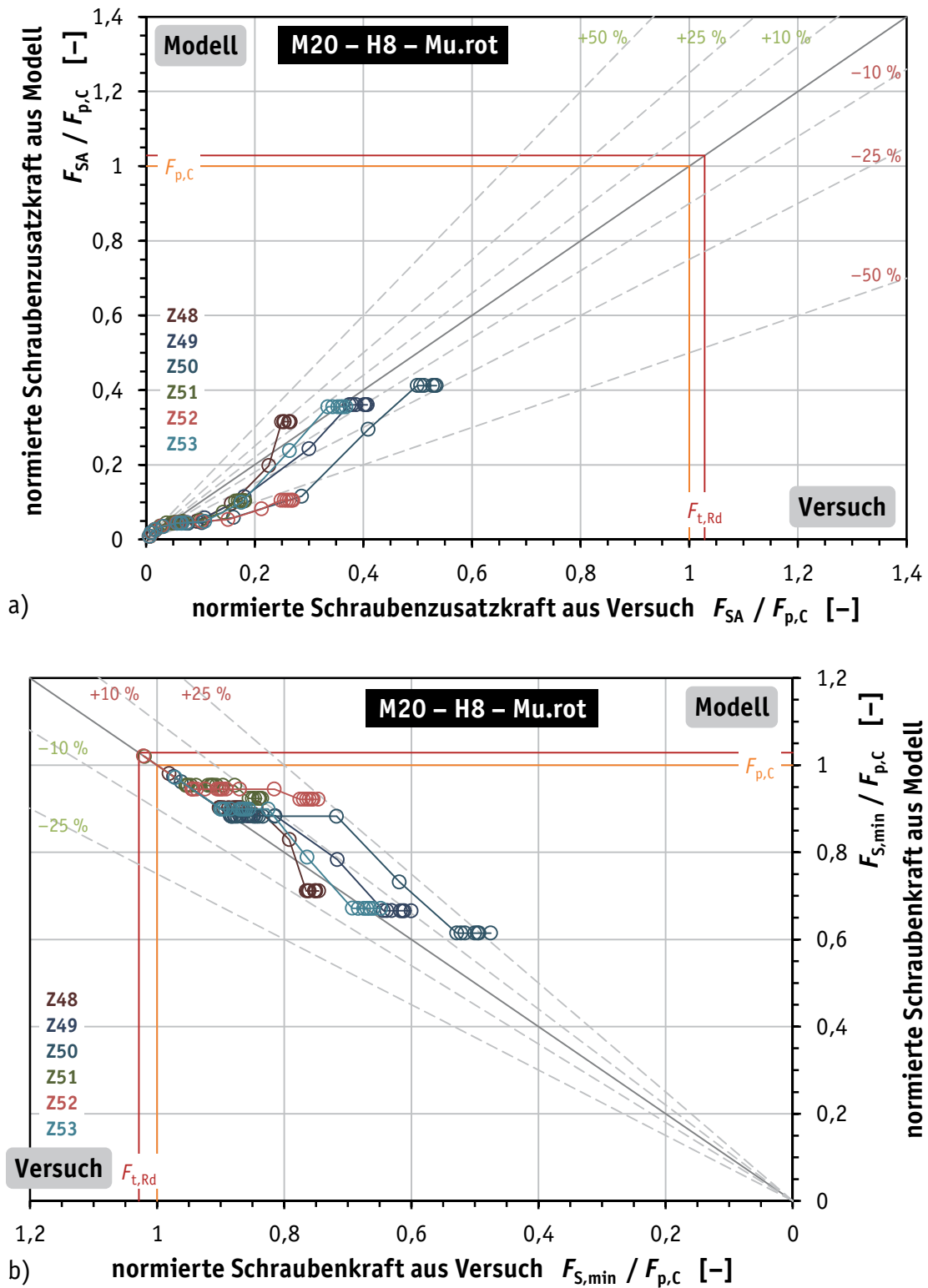
**Bild D.82.** Streudiagramme für Serie M20 – H8 – Shr.fix mit  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normierte Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft  $F_{S,min}$

**Figure D.82.** Scatterplots for M20 – H8 – Shr.fix series with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normalised additional bolt load  $F_{SA}$ , (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$



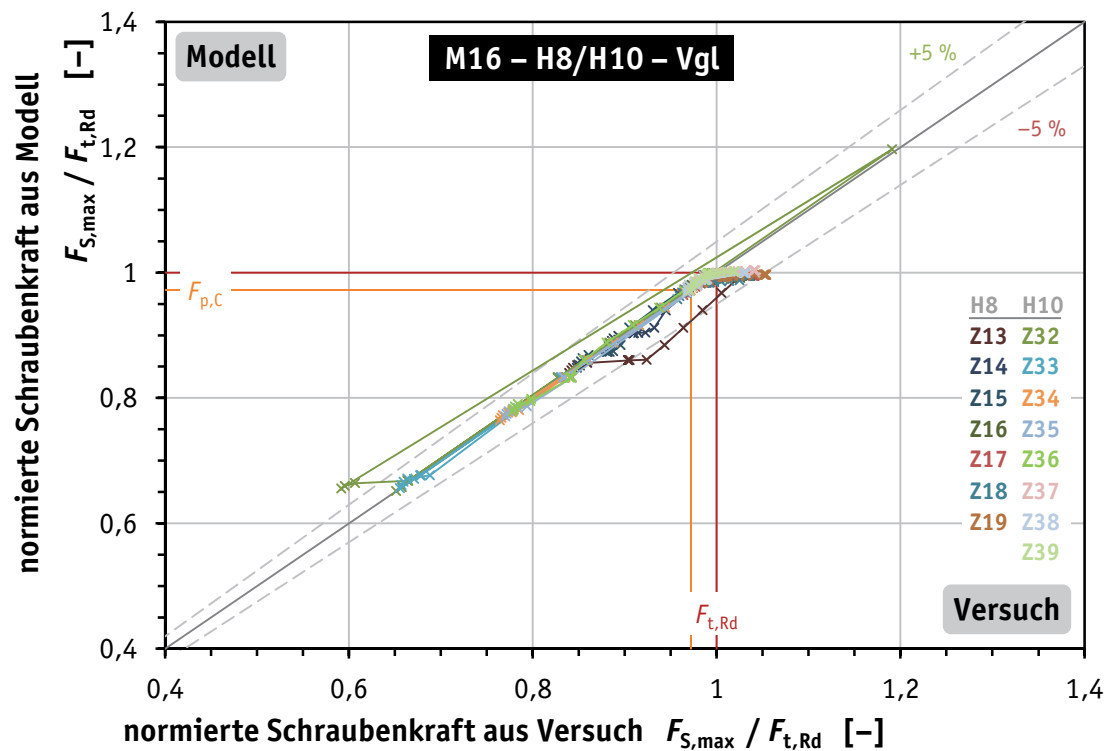
**Bild D.83.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M20 – H8 – Mu.rot mit  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

**Figure D.83.** Scatterplot of the normalised bolt loads for M20 – H8 – Mu.rot series with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximum bolt load  $F_{S,max}$



**Bild D.84.** Streudiagramme für Serie M20 – H8 – Mu.rot mit  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normierte Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft  $F_{S,min}$

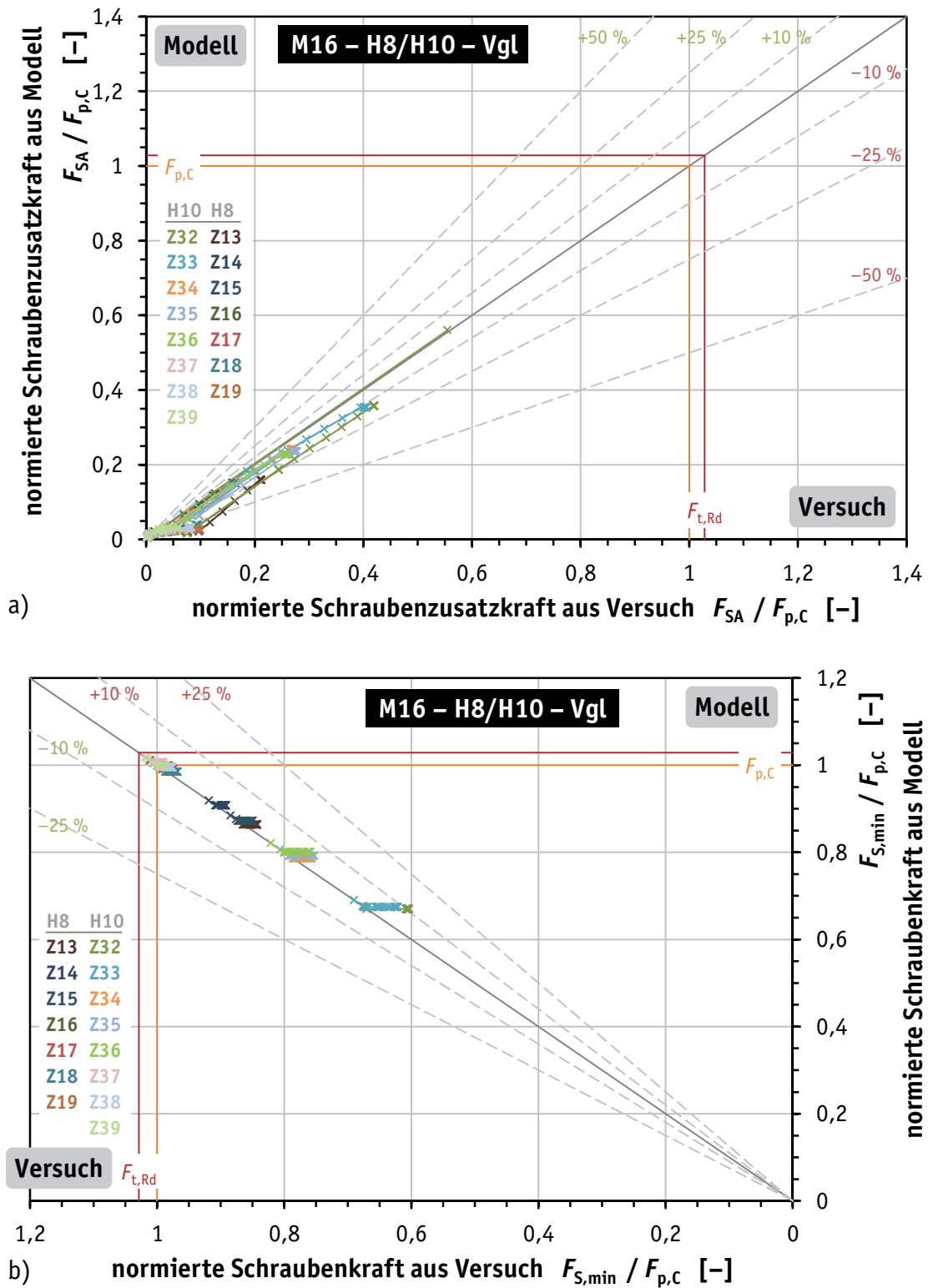
**Figure D.84.** Scatterplots for M20 – H8 – Mu.rot series with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normalised additional bolt load  $F_{SA}$ , (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$



**Bild D.85.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H8/H10 – Vgl (ohne DTI) mit  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

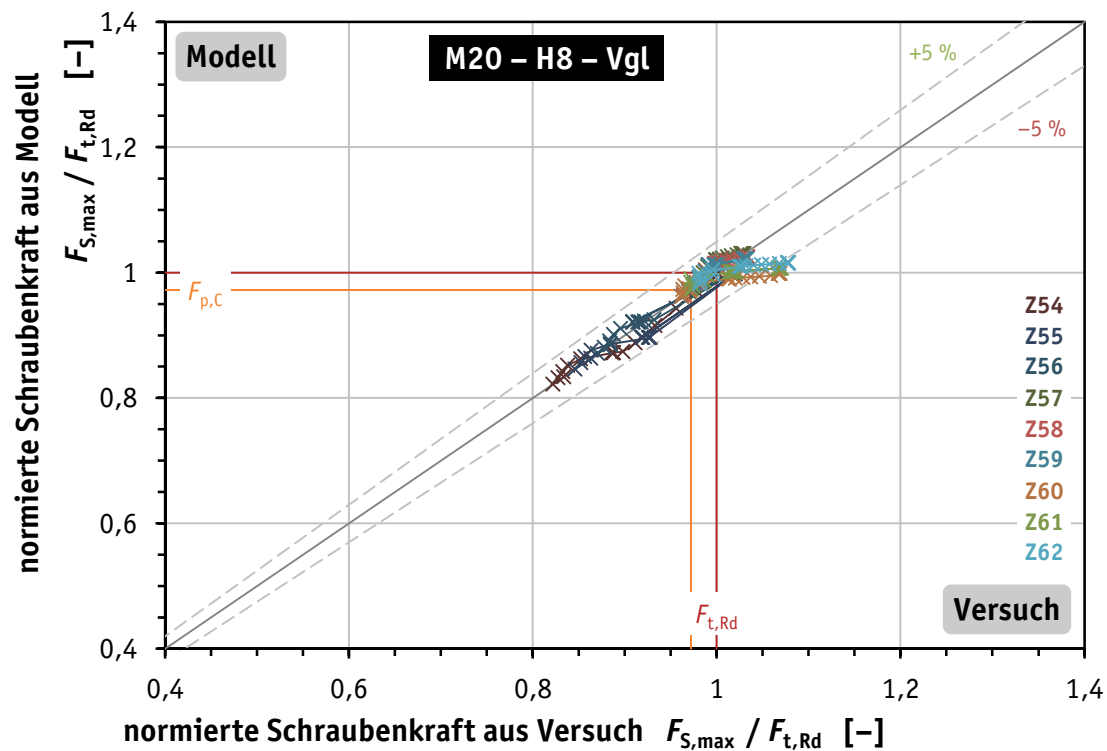
**Figure D.85.** Scatterplot of the normalised bolt loads for M16 – H8/H10 – Vgl series (without DTI) with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximum bolt load  $F_{S,max}$





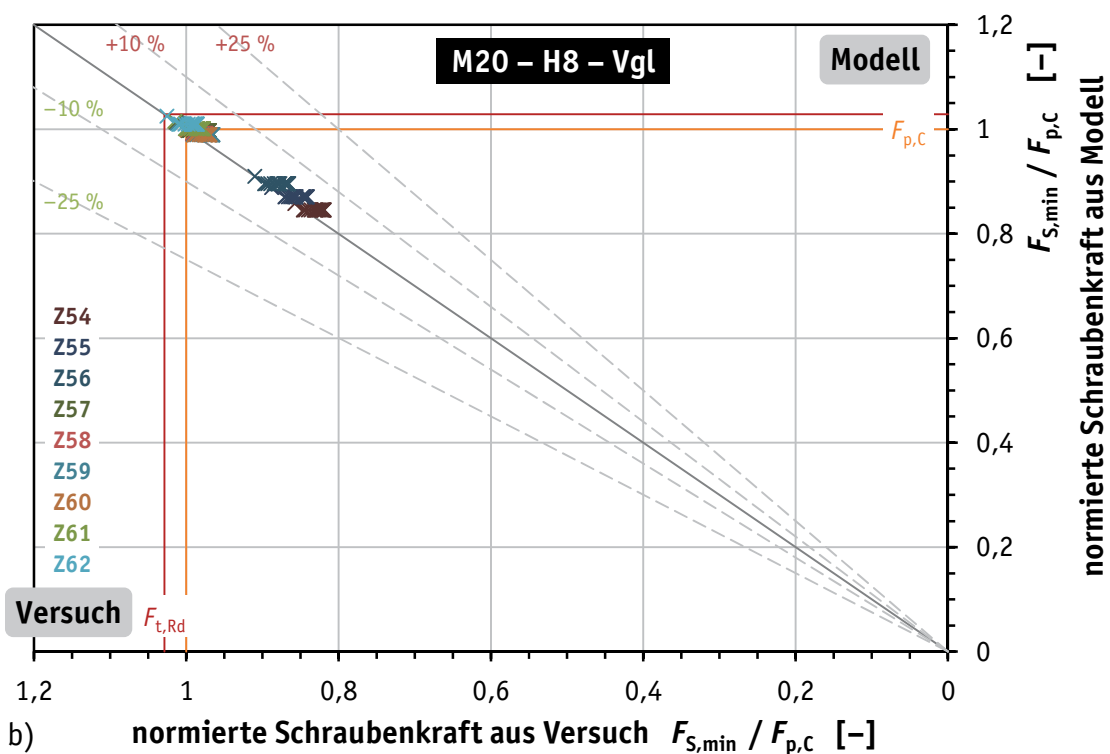
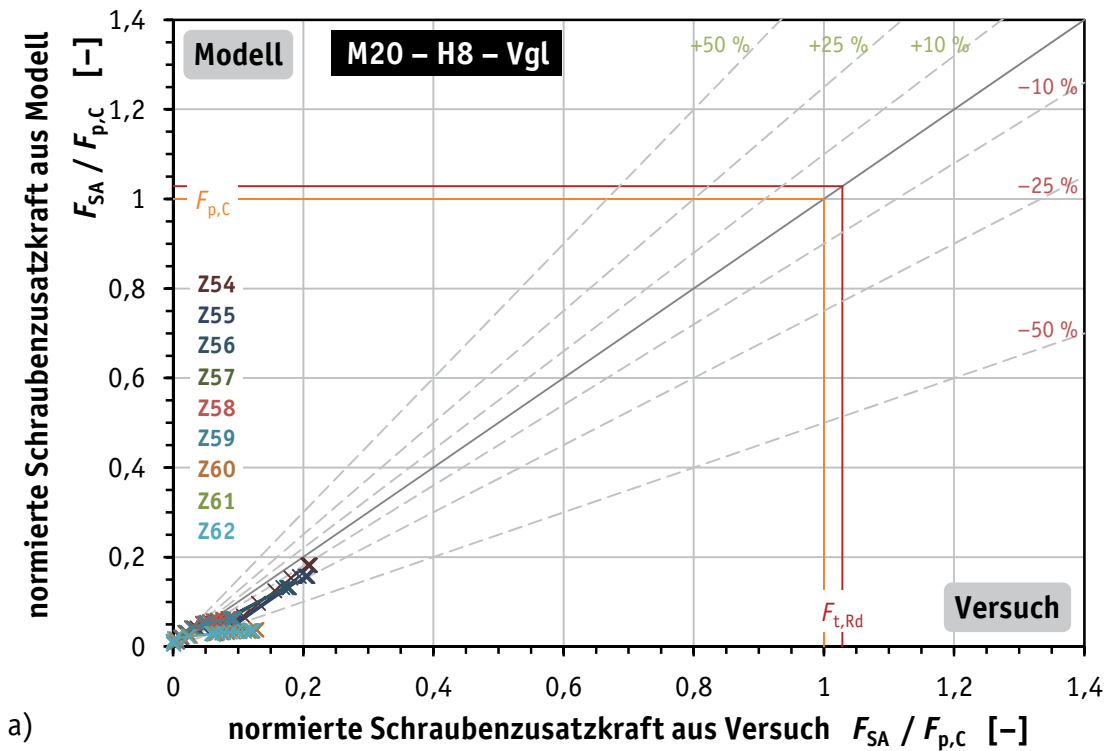
**Bild D.86.** Streudiagramme für Serie M16 – H8/H10 – Vgl (ohne DTI) mit  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normierte Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft  $F_{S,min}$

**Figure D.86.** Scatterplots for M16 – H8/H10 – Vgl series (without DTI) with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normalised additional bolt load  $F_{SA}$ , (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$



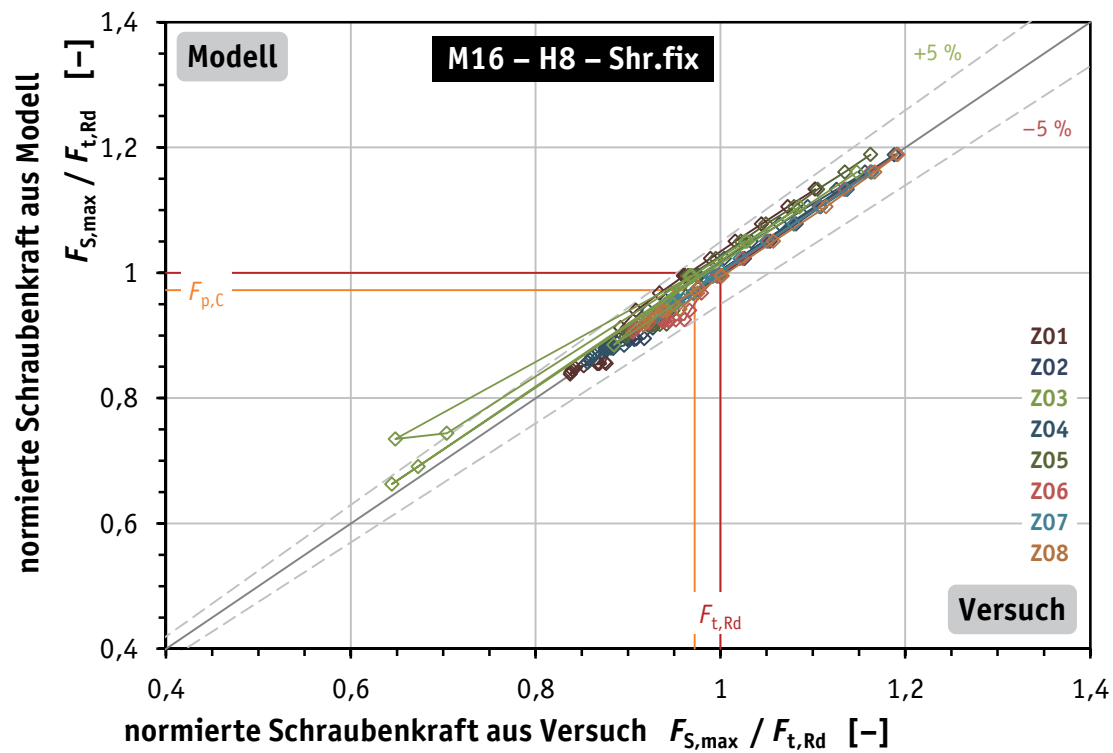
**Bild D.87.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M20 – H8 – Vgl (ohne DTI) mit  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

**Figure D.87.** Scatterplot of the normalised bolt loads for M20 – H8 – Vgl series (without DTI) with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : maximum bolt load  $F_{S,max}$



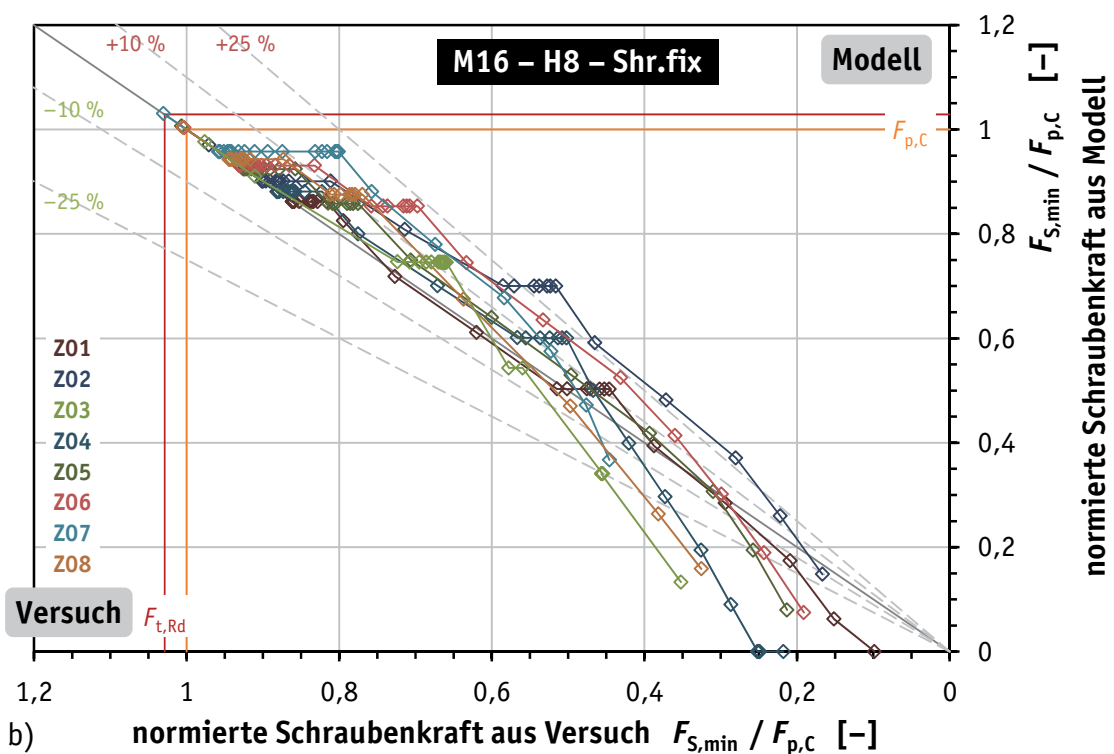
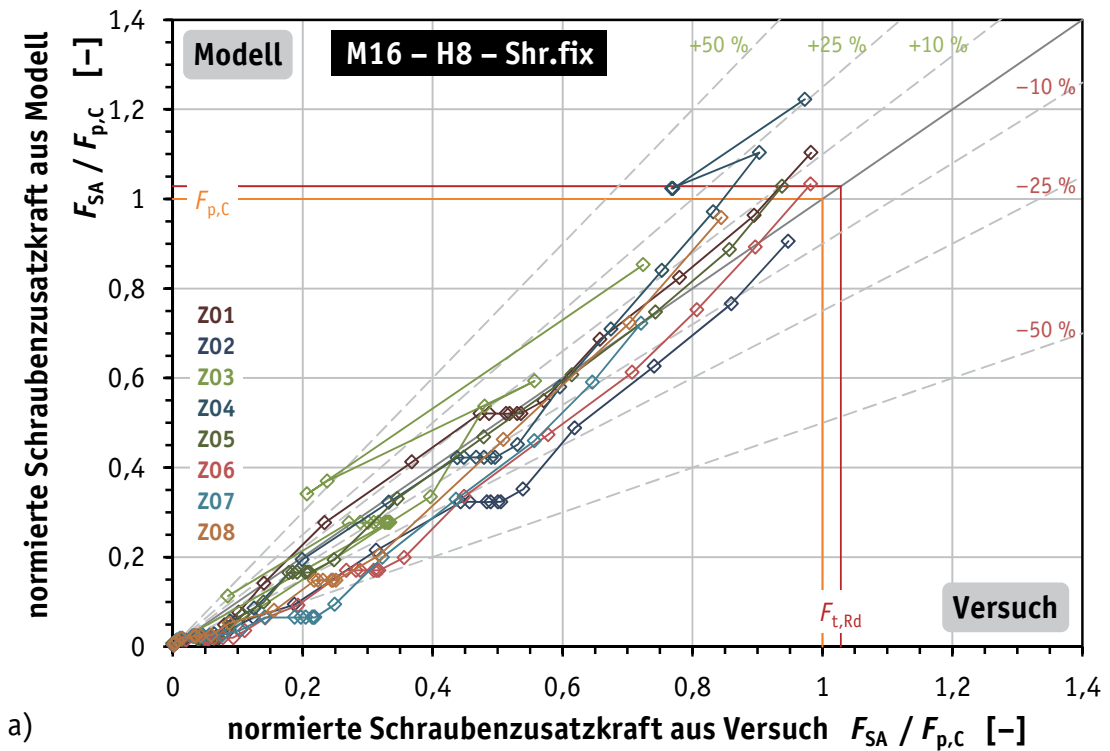
**Bild D.88.** Streudiagramme für Serie M20 – H8 – Vgl (ohne DTI) mit  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normierte Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft  $F_{S,min}$

**Figure D.88.** Scatterplots for M20 – H8 – Vgl series (without DTI) with  $F_A \leq F_{t,Rd}$ : (a) normalised additional bolt load  $F_{SA}$ , (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$



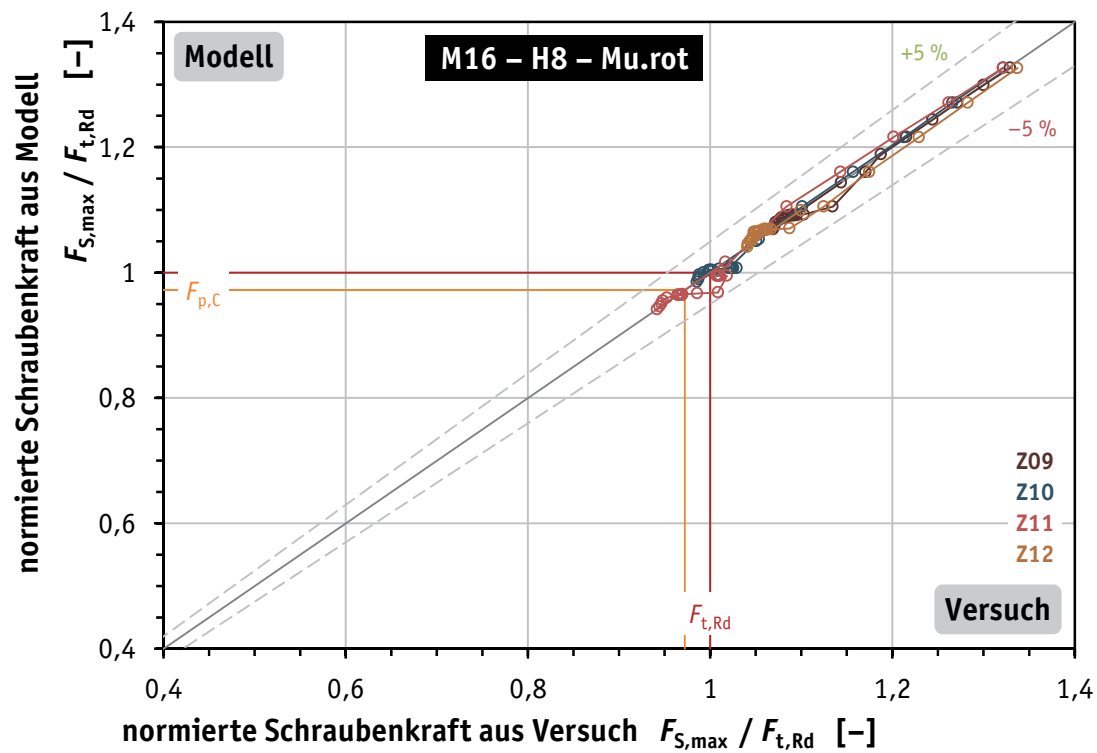
**Bild D.89.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H8 – Shr.fix: maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

**Figure D.89.** Scatterplot of the normalised bolt loads for M16 – H8 – Shr.fix series: maximum bolt load  $F_{S,max}$



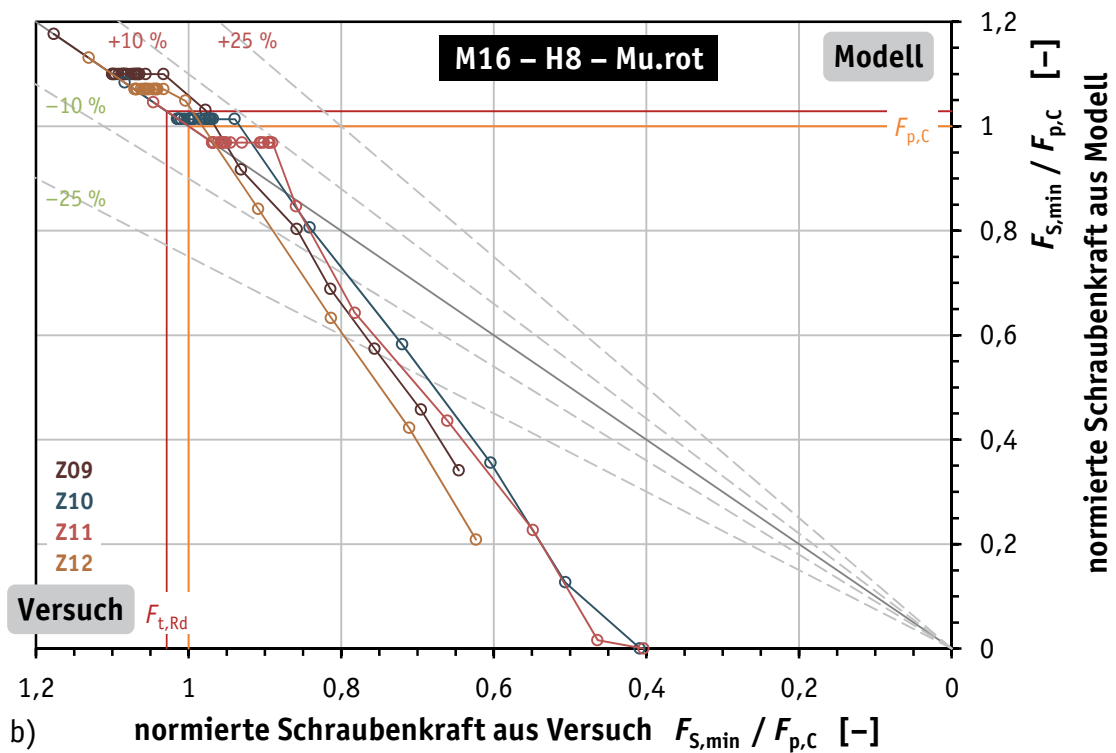
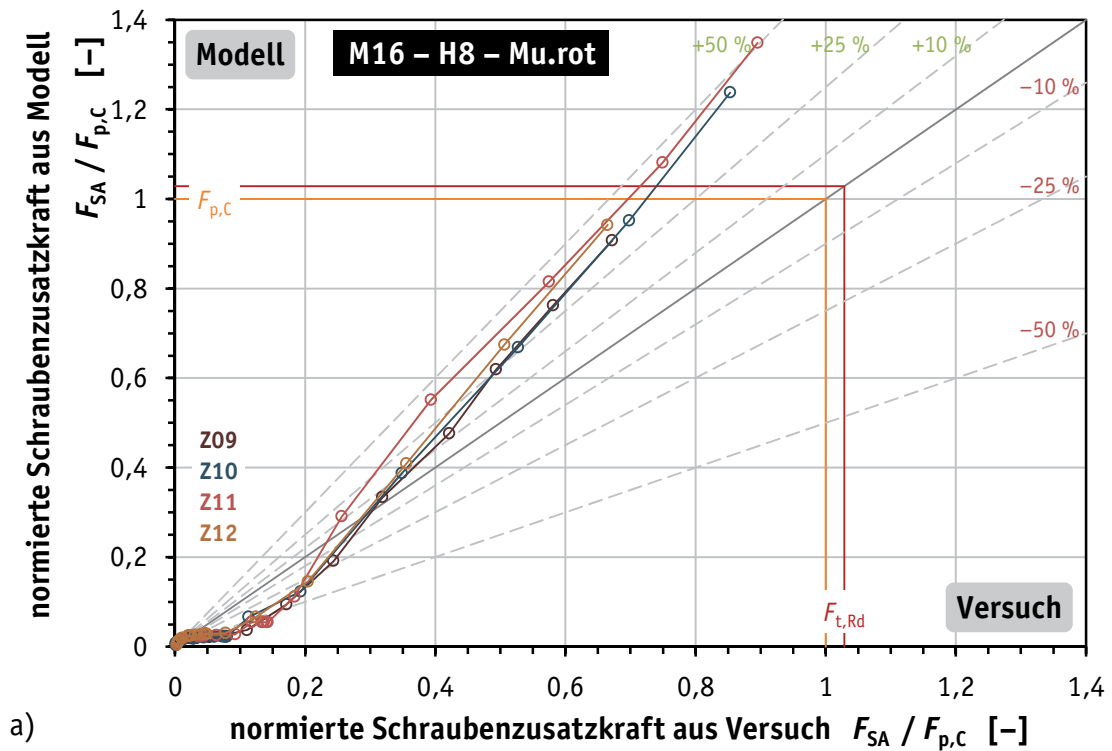
**Bild D.90.** Streudiagramme für Serie M16 – H8 – Shr.fix: (a) normierte Schraubenzusatzkraft  $F_{SAr}$  (b) normierte Restvorspannkraft  $F_{S,min}$

**Figure D.90.** Scatterplots for M16 – H8 – Shr.fix series: (a) normalised additional bolt load  $F_{SAr}$  (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$



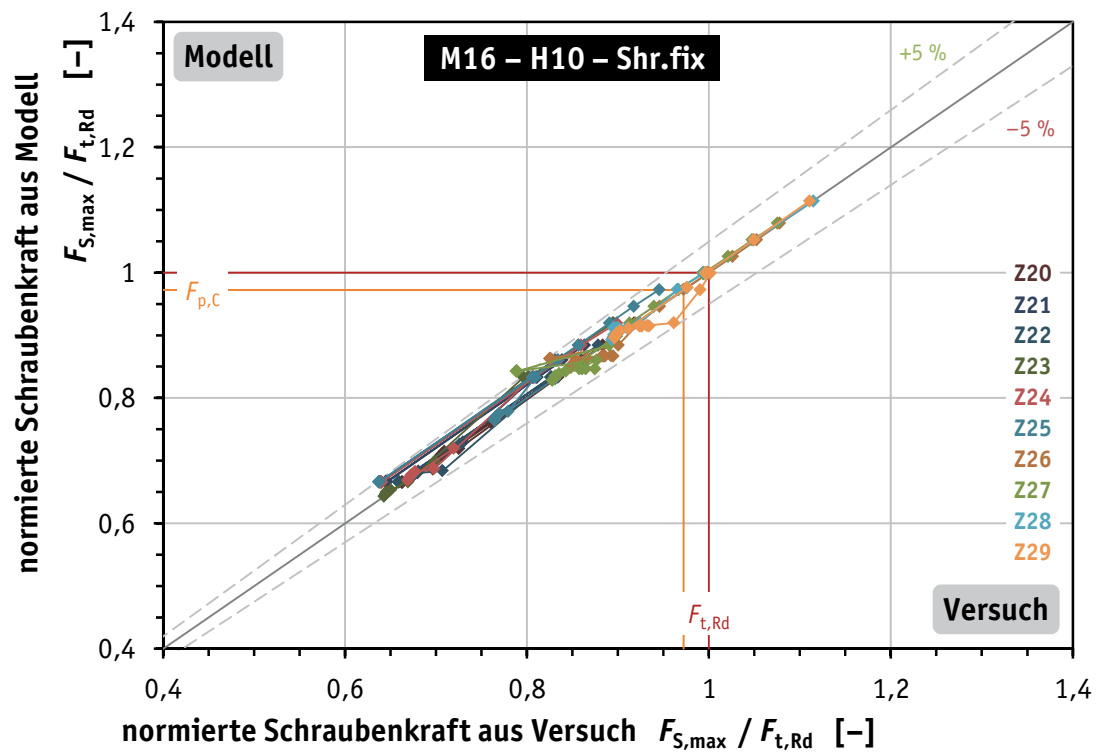
**Bild D.91.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H8 – Mu.rot: maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

**Figure D.91.** Scatterplot of the normalised bolt loads for M16 – H8 – Mu.rot series: maximum bolt load  $F_{S,max}$



**Bild D.92.** Streudiagramme für Serie M16 – H8 – Mu.rot: (a) normierte Schraubenzusatzkraft  $F_{SAr}$  (b) normierte Restvorspannkraft  $F_{S,min}$

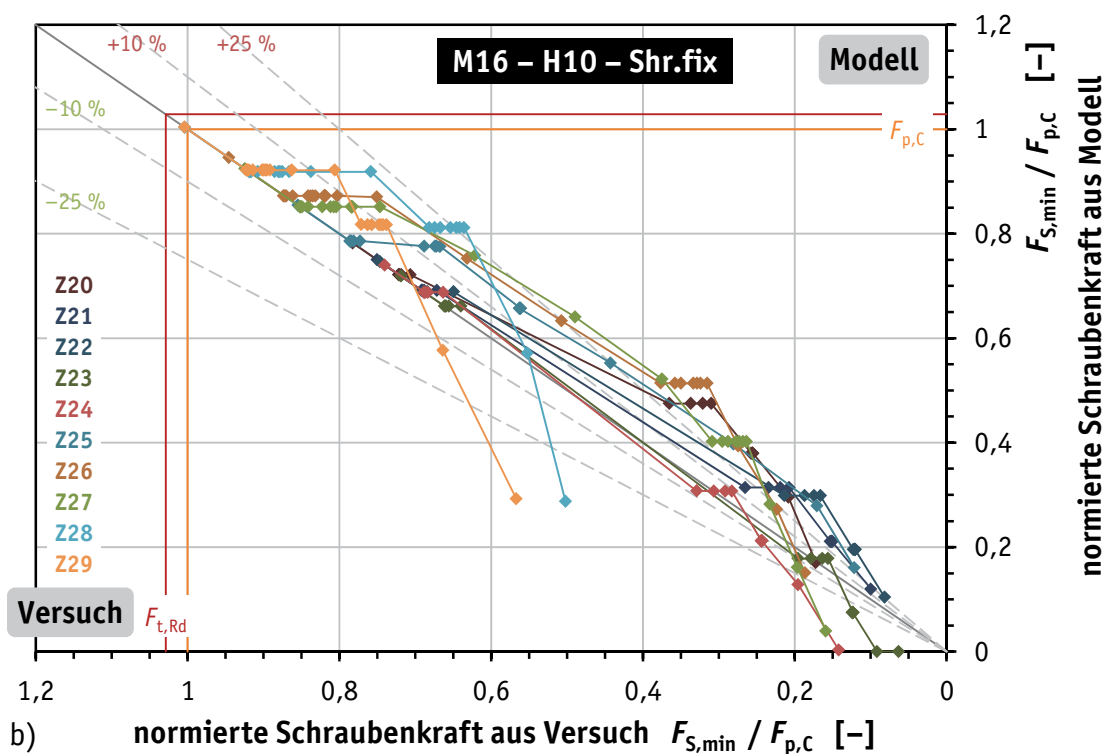
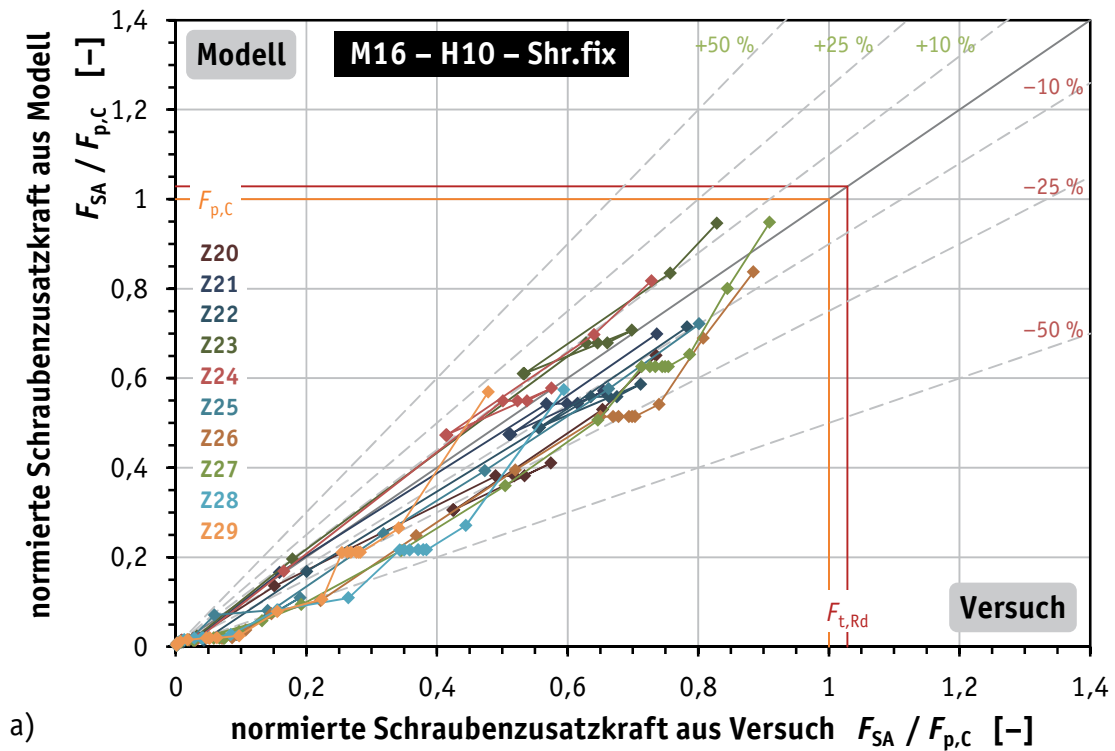
**Figure D.92.** Scatterplots for M16 – H8 – Mu.rot series: (a) normalised additional bolt load  $F_{SAr}$  (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$



**Bild D.93.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H10 – Shr.fix: maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

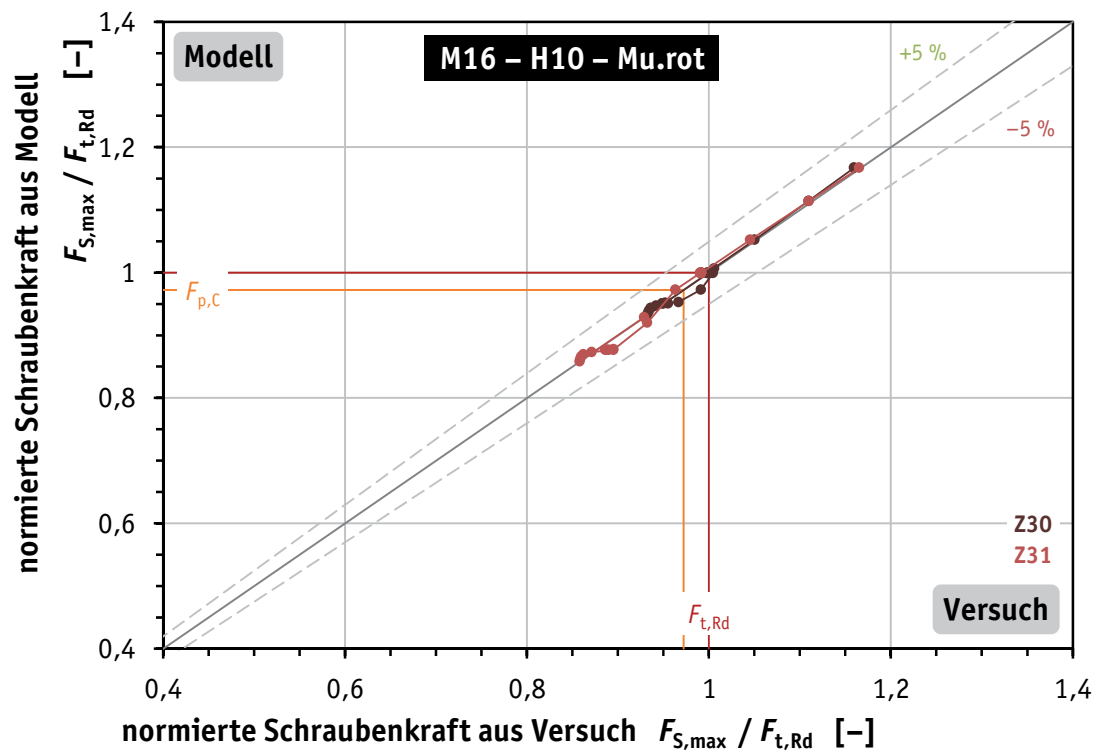
**Figure D.93.** Scatterplot of the normalised bolt loads for M16 – H10 – Shr.fix series: maximum bolt load  $F_{S,max}$





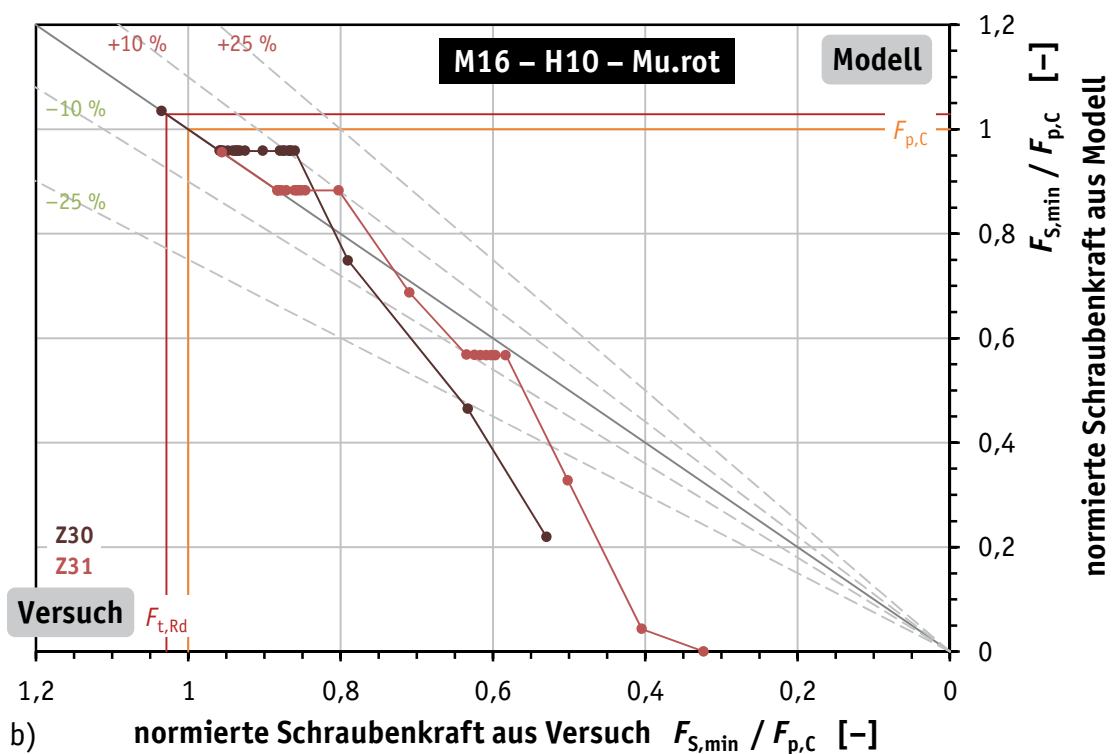
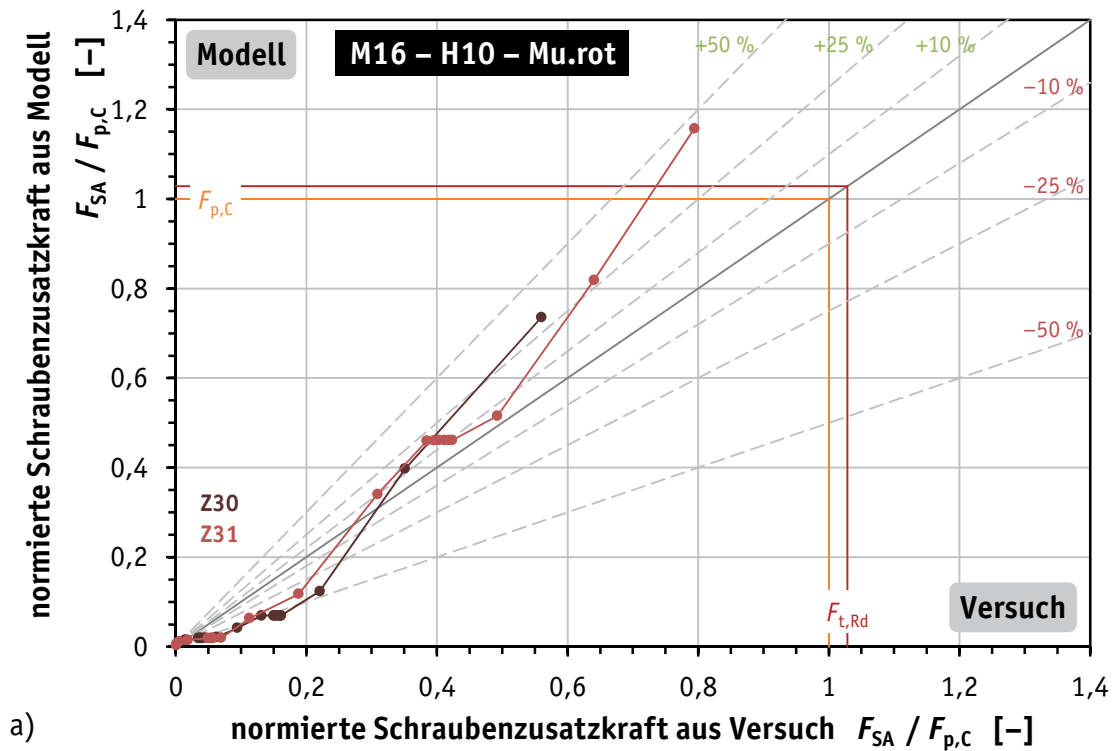
**Bild D.94.** Streudiagramme für Serie M16 – H10 – Shr.fix: (a) normierte Schraubenzusatzkraft  $F_{SAr}$  (b) normierte Restvorspannkraft  $F_{S,min}$

**Figure D.94.** Scatterplots for M16 – H10 – Shr.fix series: (a) normalised additional bolt load  $F_{SAr}$  (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$



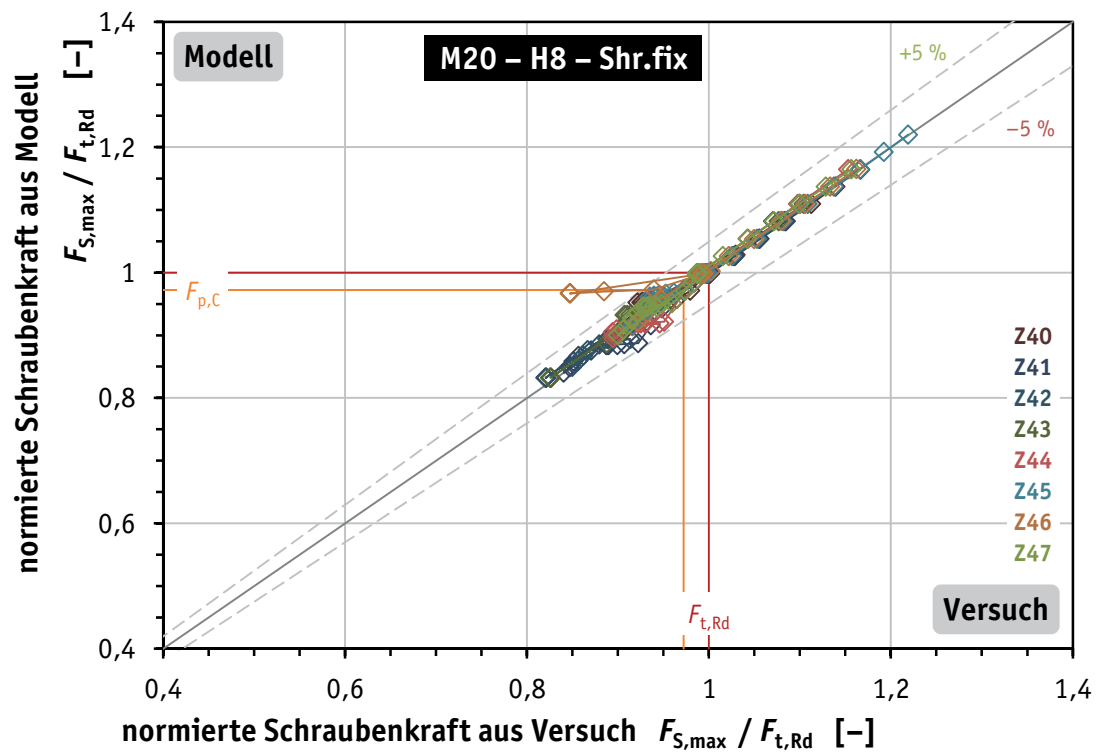
**Bild D.95.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H10 – Mu.rot: maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

**Figure D.95.** Scatterplot of the normalised bolt loads for M16 – H10 – Mu.rot series: maximum bolt load  $F_{S,max}$



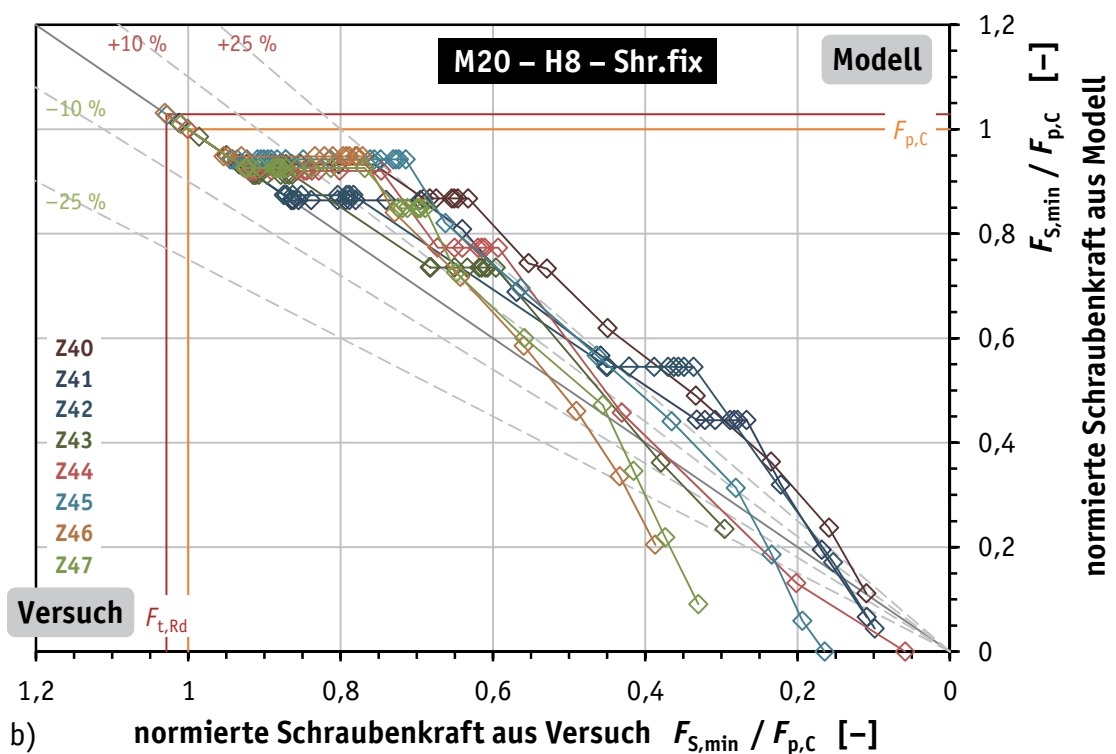
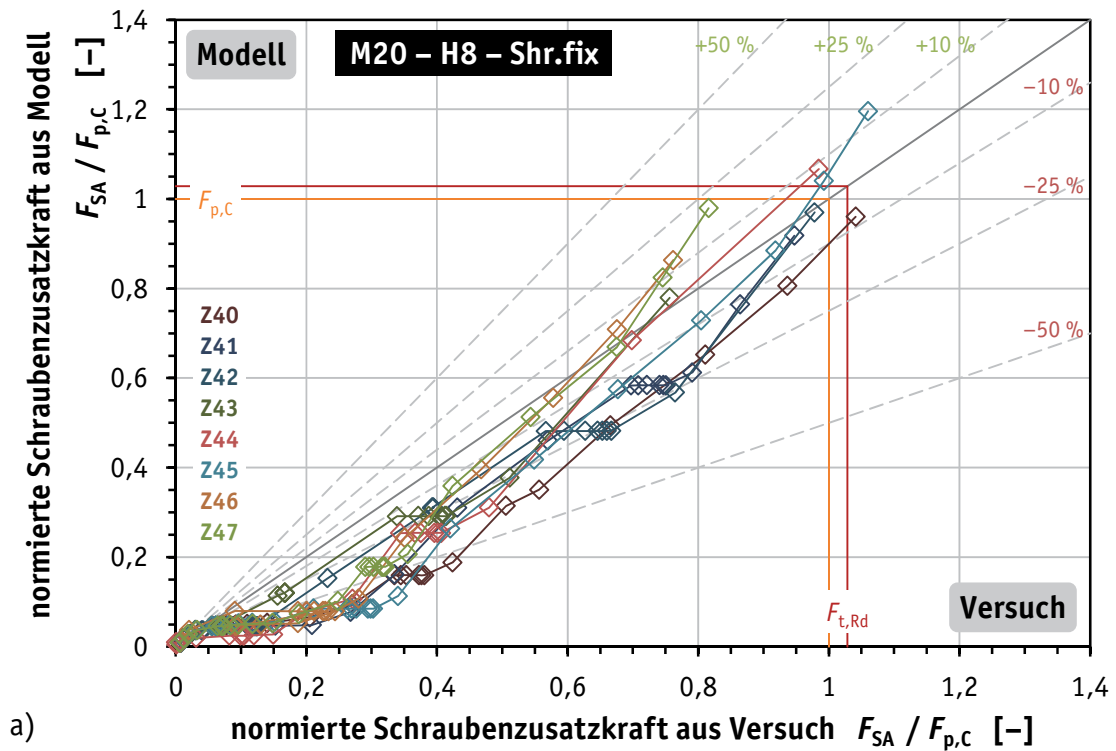
**Bild D.96.** Streudiagramme für Serie M16 – H10 – Mu.rot: (a) normierte Schraubenzusatzkraft  $F_{SAr}$  (b) normierte Restvorspannkraft  $F_{S,min}$

**Figure D.96.** Scatterplots for M16 – H10 – Mu.rot series: (a) normalised additional bolt load  $F_{SAr}$  (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$



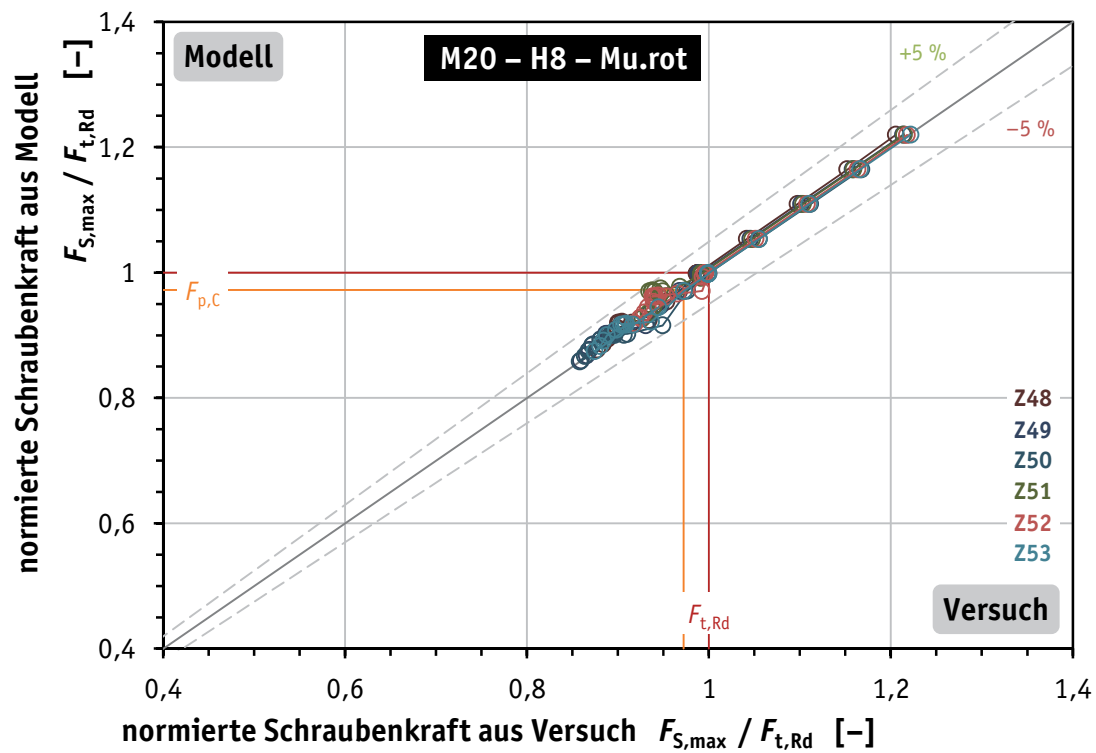
**Bild D.97.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M20 – H8 – Shr.fix: maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

**Figure D.97.** Scatterplot of the normalised bolt loads for M20 – H8 – Shr.fix series: maximum bolt load  $F_{S,max}$



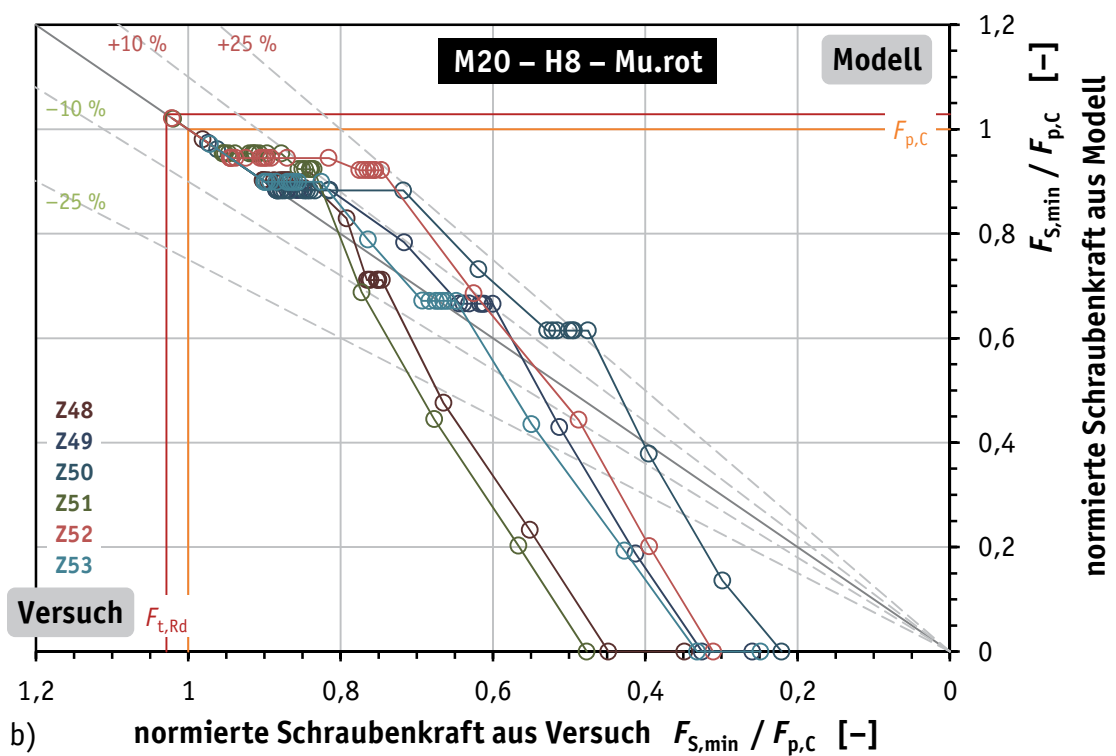
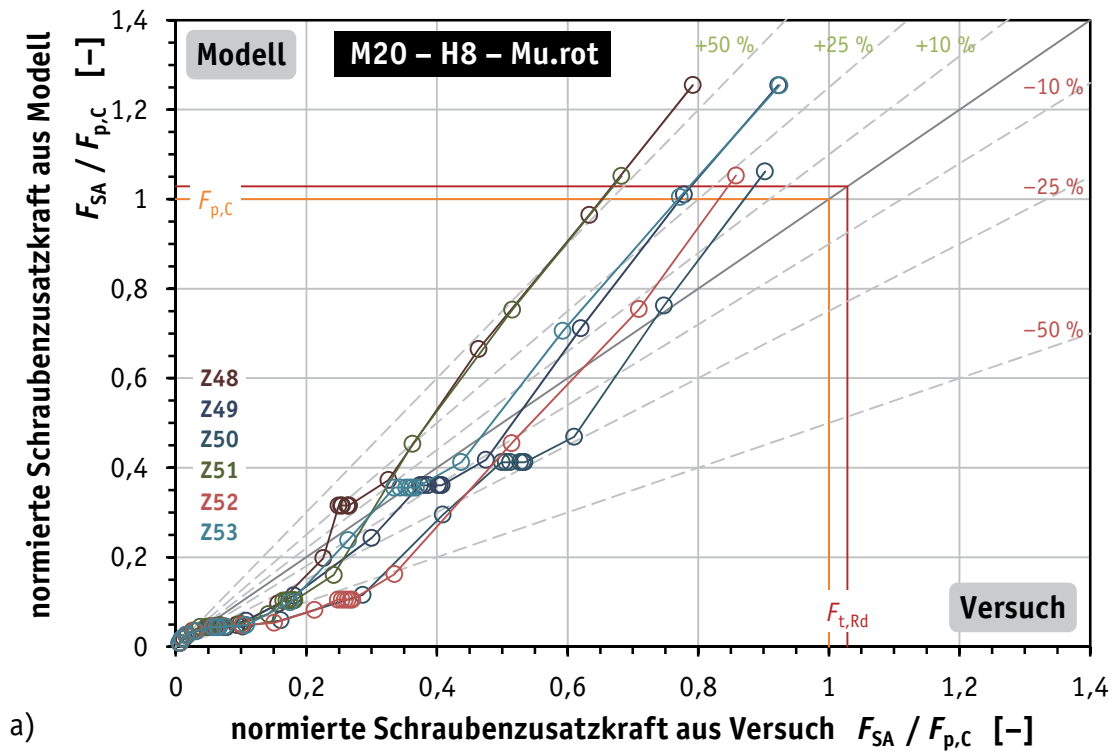
**Bild D.98.** Streudiagramme für Serie M20 – H8 – Shr.fix: (a) normierte Schraubenzusatzkraft  $F_{SAr}$  (b) normierte Restvorspannkraft  $F_{S,min}$

**Figure D.98.** Scatterplots for M20 – H8 – Shr.fix series: (a) normalised additional bolt load  $F_{SAr}$  (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$



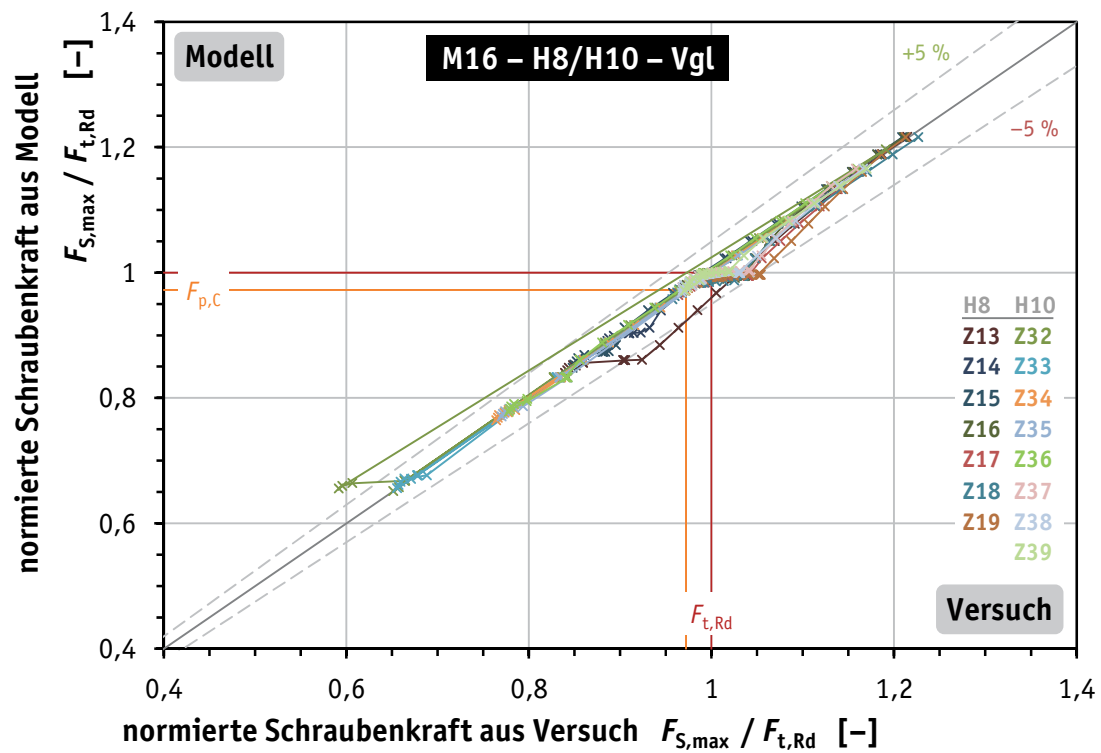
**Bild D.99.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M20 – H8 – Mu.rot: maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

**Figure D.99.** Scatterplot of the normalised bolt loads for M20 – H8 – Mu.rot series: maximum bolt load  $F_{S,max}$



**Bild D.100.** Streudiagramme für Serie M20 – H8 – Mu.rot: (a) normierte Schraubenzusatzkraft  $F_{SAr}$  (b) normierte Restvorspannkraft  $F_{S,min}$

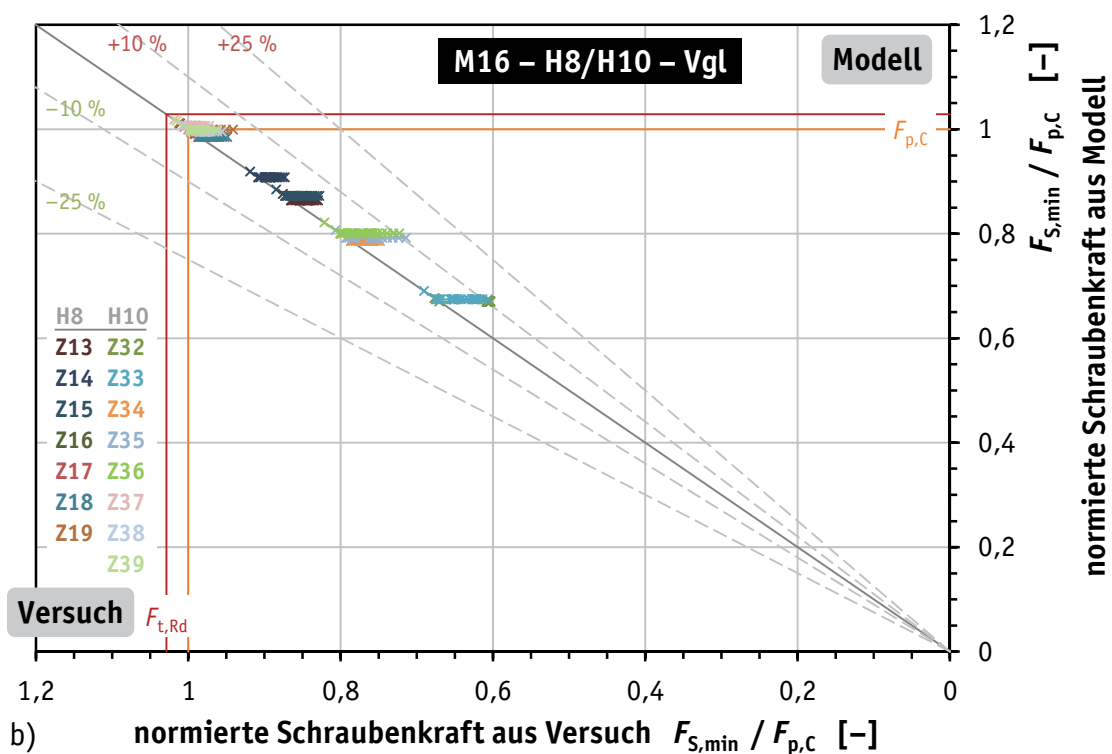
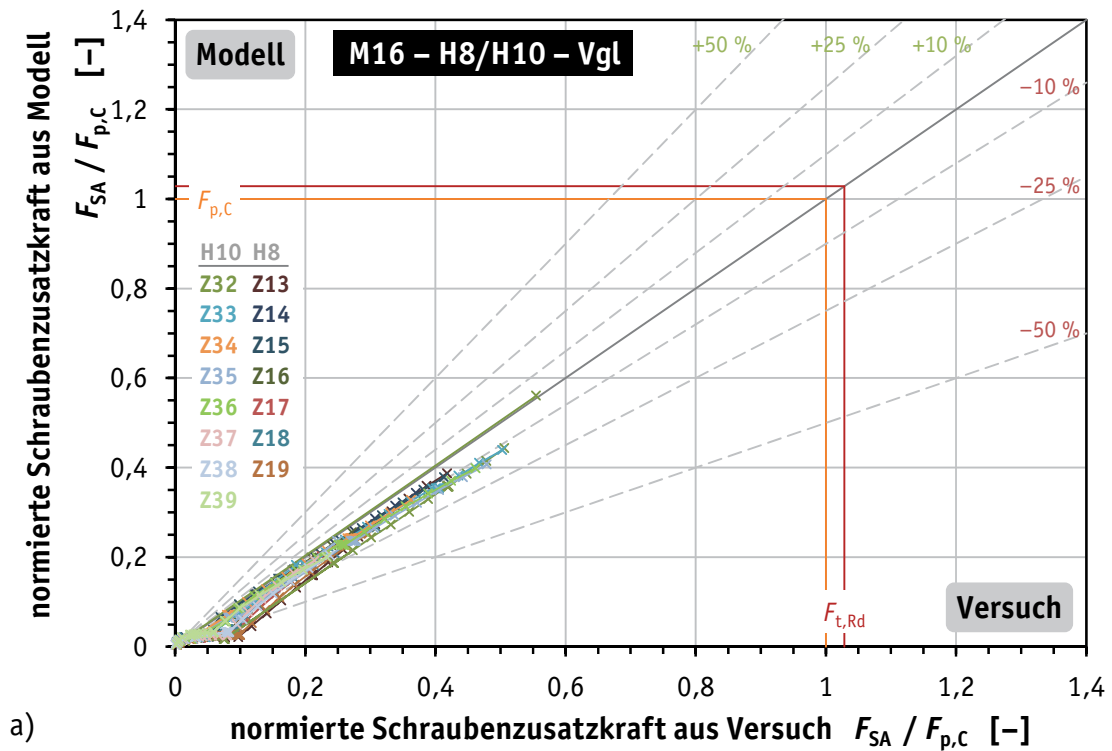
**Figure D.100.** Scatterplots for M20 – H8 – Mu.rot series: (a) normalised additional bolt load  $F_{SAr}$  (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$



**Bild D.101.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M16 – H8/H10 – Vgl (ohne DTI): maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

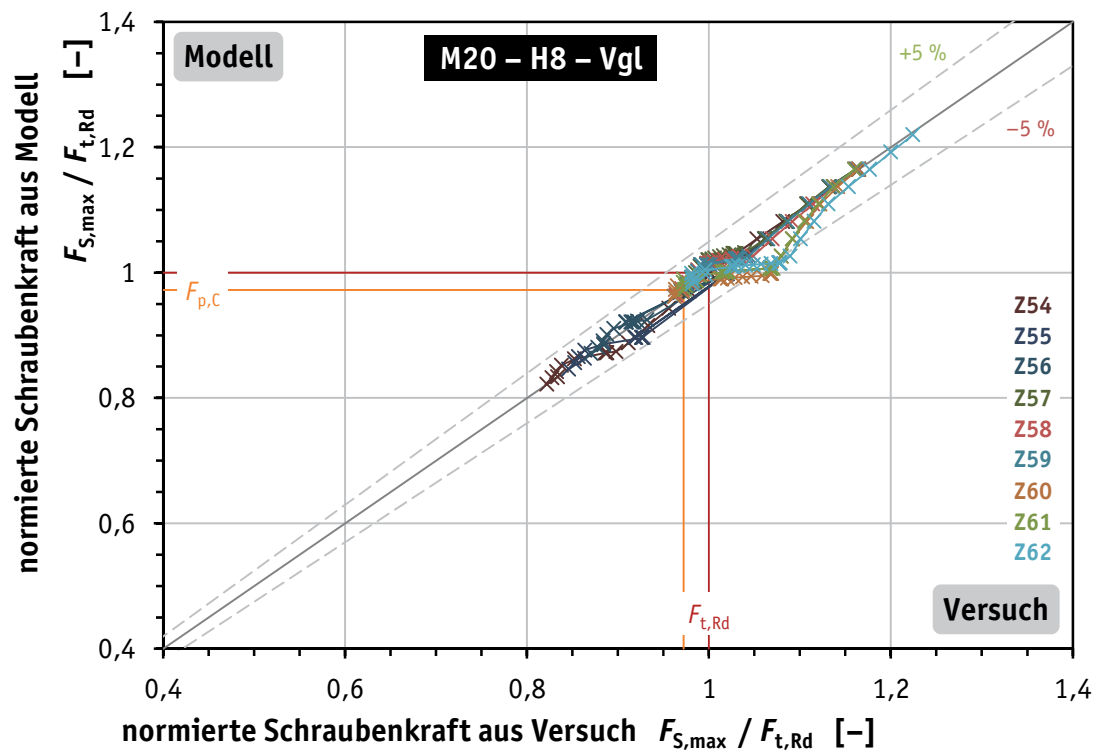
**Figure D.101.** Scatterplot of the normalised bolt loads for M16 – H8/H10 – Vgl series (without DTI): maximum bolt load  $F_{S,max}$





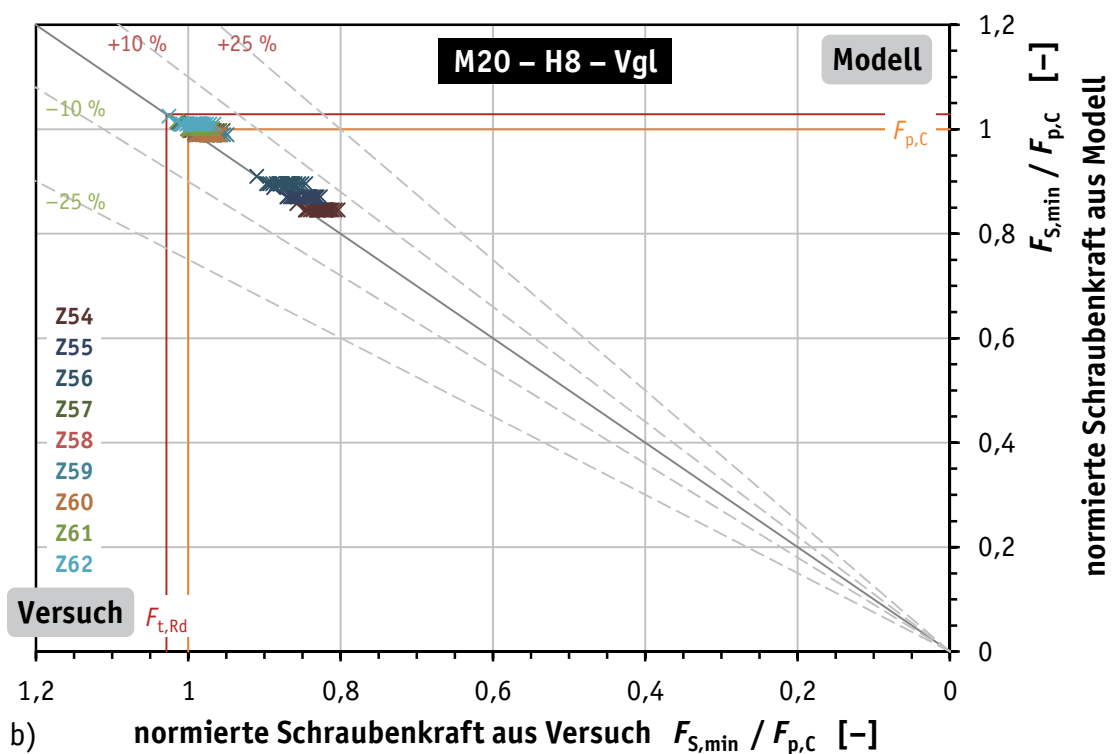
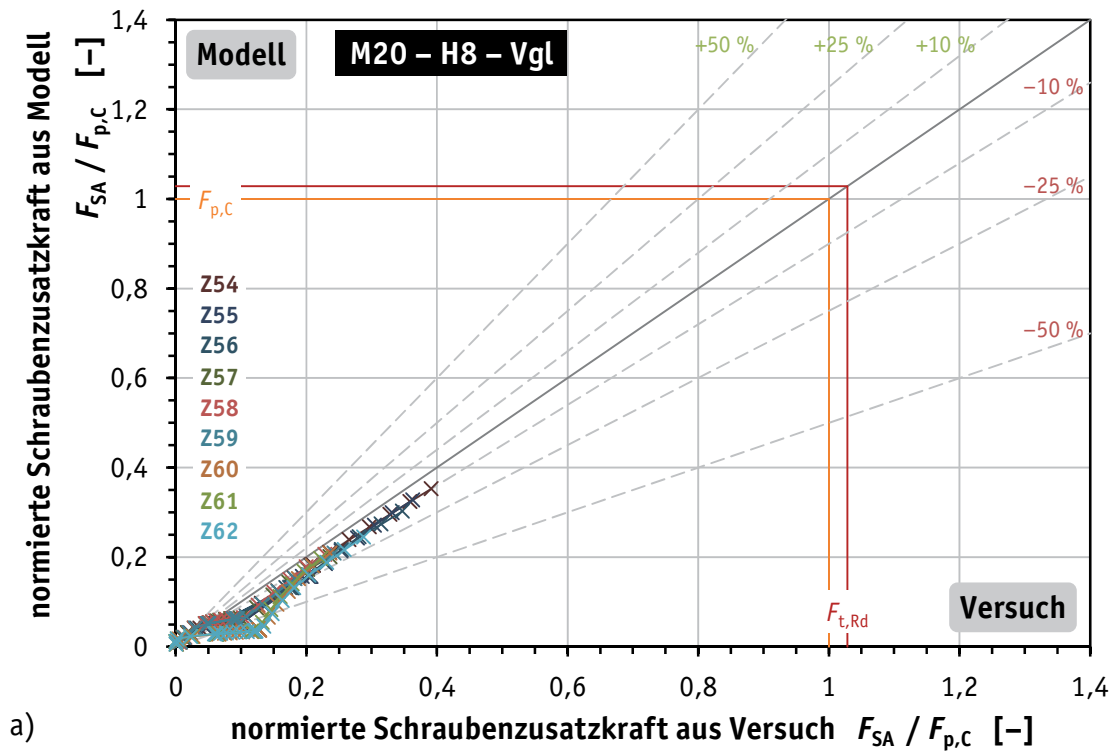
**Bild D.102.** Streudiagramme für Serie M16 – H8/H10 – Vgl (ohne DTI): (a) normierte Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft  $F_{S,min}$

**Figure D.102.** Scatterplots for M16 – H8/H10 – Vgl series (without DTI): (a) normalised additional bolt load  $F_{SA}$ , (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$



**Bild D.103.** Streudiagramm der normierten Schraubenkräfte für Serie M20 – H8 – Vgl (ohne DTI): maximale Schraubenkraft  $F_{S,max}$

**Figure D.103.** Scatterplot of the normalised bolt loads for M20 – H8 – Vgl series (without DTI): maximum bolt load  $F_{S,max}$



**Bild D.104.** Streudiagramme für Serie M20 – H8 – Vgl (ohne DTI): (a) normierte Schraubenzusatzkraft  $F_{SA}$ , (b) normierte Restvorspannkraft  $F_{S,min}$

**Figure D.104.** Scatterplots for M20 – H8 – Vgl series (without DTI): (a) normalised additional bolt load  $F_{SA}$ , (b) normalised residual preload  $F_{S,min}$



## Anhang E      Sonstiges

**[SI82]**    SURTEES, J. O.; IBRAHIM, M. E.: *Load Indicating Washers. Reprint from Civil Engineering April 1982.* [Zugriff am: 2015-12-07]. Verfügbar unter:  
<http://www.turnasure.com/pdf/reports/LIW%20%20Bolt%20Relaxation%20%20.pdf>

# ***Load indicating washers***

Reprinted from Civil Engineering April 1982

[SI82] SURTEES, J. O.; IBRAHIM, M. E.: *Load Indicating Washers. Reprint from Civil Engineering April 1982.* [Zugriff am: 2015-12-07]. Verfügbar unter: <http://www.turnasure.com/pdf/reports/LIW%20%20Bolt%20Relaxation%20%20.pdf>

# Load indicating washers

J O Surtees and M E Ibrahim discuss the influence of load-indicating washers on bolt relaxation in joints subject to high prying forces.

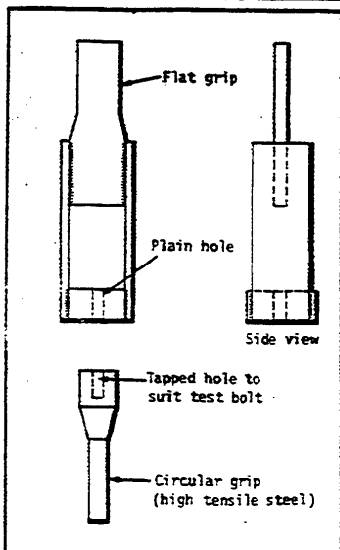
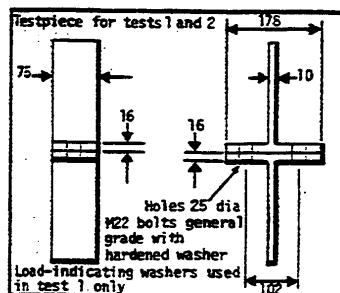
In normal use, load-indicating bolts and washers do not contribute significantly to bolt relaxation but occasional doubts have been expressed about their performance in applications where modest levels of external tension are to be transmitted. It is argued that such loading induces a further permanent compression into the indicating washer (or indicating head) which, on removal of load, contributes to bolt relaxation and lowering of shear resistance. There is no experimental or practical evidence for such a hypothesis, although in some cases of prying action (usually involving misalignment of the faying surfaces) increased bolt relaxation is known to occur whether indicators are used or not. However, the question is whether the relaxation in such cases is increased or

decreased by the presence of an indicator device.

The tests described below are designed to compare the loss of pretension under extreme prying conditions with and without a load-indicating washer. They relate to a situation where the whole of the external tensile loading is attributable to imposed load, which is also an extreme condition. The joint details are based, in two cases, on work reported by Munter and Bouwman, which enables a further comparison to be made for joints without indicators. Grade 10-8 bolts were used in the above mentioned cases for this reason, also. It should, of course, be understood that BS 4604 part 2 prohibits the use of grade 10-8 bolts as friction grip bolts when primary tensile load is present, contrary to other major European codes.

initial fit between flange surfaces. Details of the test joints are shown in Fig 1. A thin flange was used to ensure maximal prying on the bolts. The bolts were calibrated under appropriate conditions (with or without washer) in a tension rig (Fig 3), using a head strain method proven to an accuracy of  $\pm 3$  per cent at 99 per cent confidence level. They were then transferred to the test pieces and tightened to proof load using the established load (for two bolts) and unloaded similarly after a 10 min pause. The procedure was repeated after a further 10 min pause, up to a peak load of 80 per cent proof load, and so on in 20 per cent increments until a peak load of 160 per cent proof load was reached.

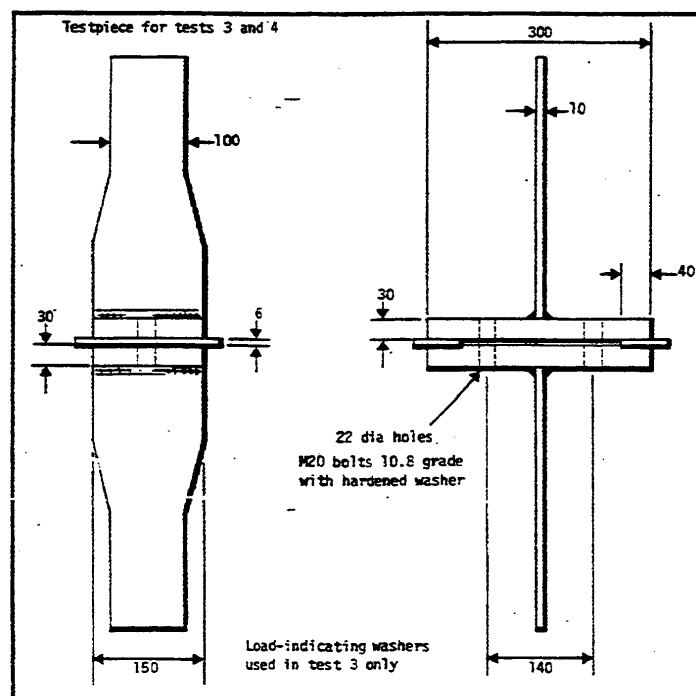
In tests 3 and 4, which simulated the effect of initial contact between the outer surfaces only, a thick flange was employed to ensure that the inner flange surfaces were not brought into contact by the application of bolt preload. The



## Description of Tests

Tests 1 and 2 relate to joints with good

Fig 1 (left). Testpiece for tests 1 and 2. Fig 2 (below) Testpiece for test 3 and 4. Fig 3 (below, left) Calibration rig basic features.



[SI82] SURTEES, J. O.; IBRAHIM, M. E.: *Load Indicating Washers. Reprint from Civil Engineering April 1982. [Zugriff am: 2015-12-07]. Verfügbar unter: <http://www.turnasure.com/pdf/reports/LIW%20%20Bolt%20Relaxation%20%20.pdf>*

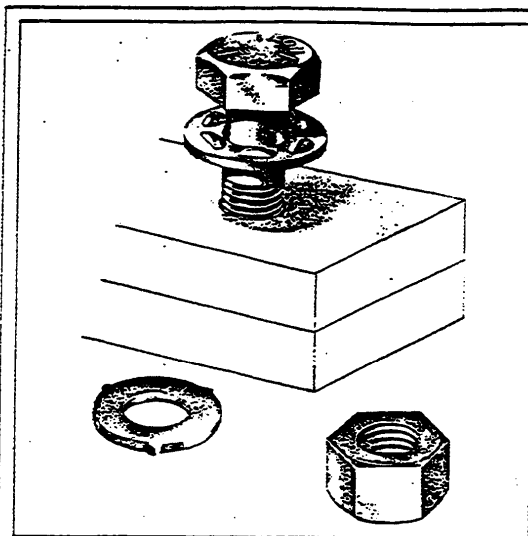


Fig 4. Load indicating washer assembly.

test pieces are shown in Fig 2. The calibration procedure was similar to that used in the previous tests. Loading was applied in steps of 25 kN up to an initial peak load of 20 per cent proof load (for two bolts) and released in similar steps after a period of 15 min. A further cycle was applied after 15 min, rising to 30 per cent proof load, and so on, for a total of seven cycles culminating in a peak load of 80 per cent proof load.

During calibration of the bolts for test 4, an opportunity was taken to examine the relationship between bolt tension and average load indicator gap. Four

bolts were tested altogether, including the two subsequently used in test 4. The gap measurements were made by feeler gauge at three positions around the bolt head.

#### Test Results

Upper and lower extremes in the relationship between load indicator gap and bolt tension are shown in Fig 5. These relate to bolts 1 and 2, subsequently used in test 4. The average gap recommended by the manufacturer corresponded to measured bolt tensions ranging from 98 to 104 per cent of the minimum proof

load, which was well within the range permitted by BS 4395 part 2 (viz  $\pm 15$  per cent of proof load).

The relationship between bolt tension and external load for tests 1 to 4 is shown in Figs 6 to 9 respectively. Bolt tension is expressed as the percentage change from initial preload, whilst external load is expressed as a percentage of the proof load for a single bolt.

In tests 1 and 2, there was no significant difference in performance with or without load indicating washer. The change in bolt tension, following application and removal of a given level

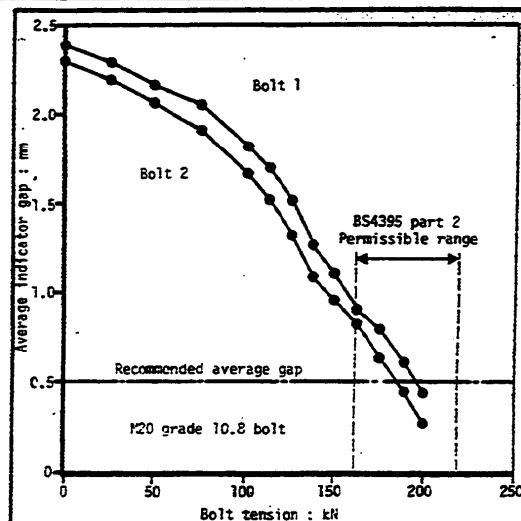


Fig 5. Relationship between bolt tension and load-indicator washer gap.

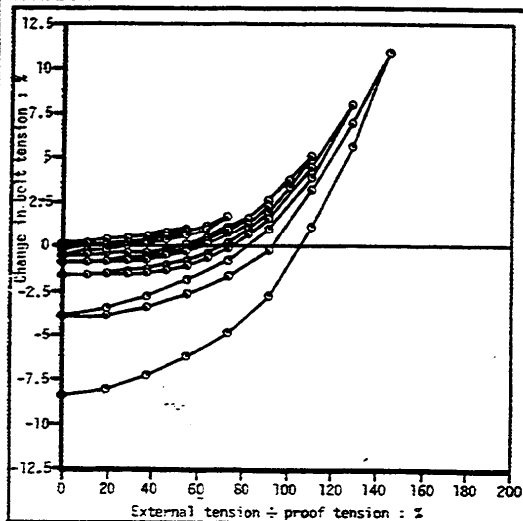


Fig 6. Tests 1 and 2 - typical relationship between external tension and change in bolt tension.

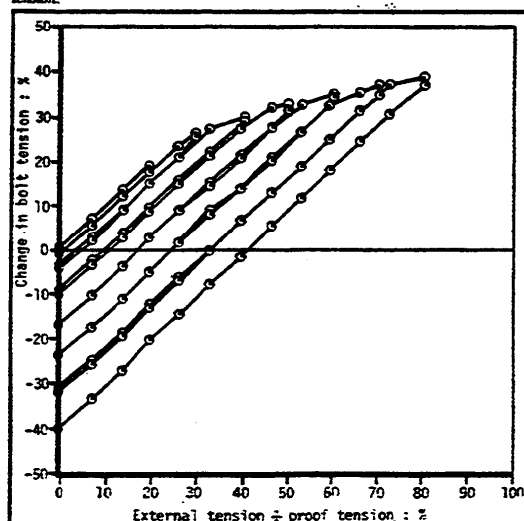


Fig 7. Test 3/bolt 1 - relationship between external tension and change in bolt tension.

[SI82] SURTEES, J. O.; IBRAHIM, M. E.: *Load Indicating Washers. Reprint from Civil Engineering April 1982.* [Zugriff am: 2015-12-07]. Verfügbar unter: <http://www.turnasure.com/pdf/reports/LIW%20%20Bolt%20Relaxation%20%20.pdf>

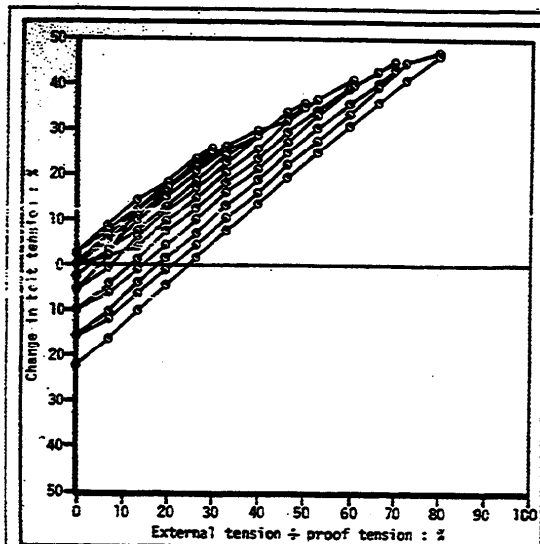


Fig 8. Test 3/bolt 2 - relationship between external tension and change in bolt tension.

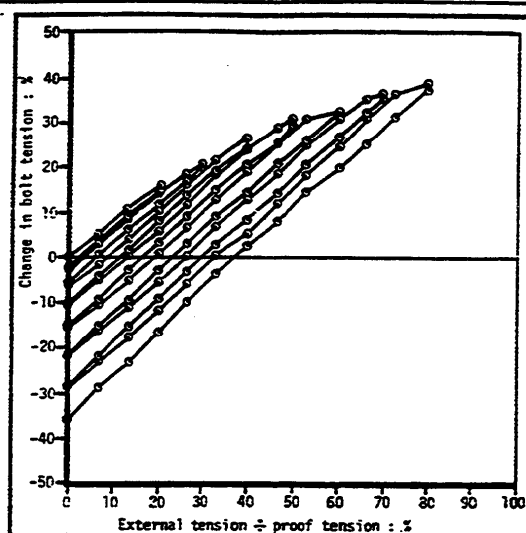


Fig 9. Test 4/bolt 1 - relationship between external tension and change in bolt tension (bolt 2 similar).

of external load, was marginally less when load indicators were used. At an external load per bolt of 60 per cent proof load (the maximum permitted by BS 4604 part 1 for general grade bolts) the change was less than 1 per cent of initial preload. At 160 per cent proof load the change was still below 10 per cent of preload.

In tests 3 and 4 the effects of prying action were quite evident. The change in bolt tension was approximately 80 per cent of the applied external load per bolt at low levels of external load and approx 100 per cent at medium-to-high levels of external load, thus confirming the result obtained by Munter and Bouwman. The difference between performance with and without load indicators was quite pronounced, also. The average loss of preload in two bolts after application and removal of an external load per bolt of 80 per cent load was 29 per cent when load indicators were used and 39 per cent when they were omitted. At typical design levels of external tension the loss of preload was not so acute, however. For example, at 30 per cent proof load the corresponding losses of preload were 3 and 4 per cent respectively.

In test 3, the tension in the two bolts differed increasingly as the test progressed, however, the individual loss of preload at any stage was always less than the corresponding loss in test 4. Although a careful tightening procedure was used in test 3, there was evidence that one side of the joint had closed fractionally more than the other. Careful

attention was paid to tightening procedure in test 4 and in this case symmetrical closure was observed. Almost identical tensions were observed in the two bolts throughout the test. While the above phenomenon may be attributable in part to variation in bolt or plate properties, it is perhaps significant that in tests 1 and 2, where tightening procedure was of much less importance because of good fit between the plates, the relationship between external load and bolt tension was fairly consistent for all four bolts.

The beneficial influence of the indicator washer in test 3 might be attributed to several factors:

- (i) The degree of prying is controlled by the location of the fulcrum (effectively, the centre of compression) in relation to the bolt axis. Initially, the fulcrum is located at the inner edge of the steel pack, but as the bolt extends, the centre of compression is displaced towards the flange tip. The additional resilience afforded by the indicator washer enables this effect to proceed more quickly.
- (ii) The washer is harder than the flange material and reduces permanent indentation around the edge of the hole.
- (iii) After the indicator gap has closed to less than 0.5 mm, a major portion of the energy subsequently stored in the washer is recoverable, whereas, substantial losses occur in the bolt in zones of plasticity at the junction between head and shank and at the base of loaded threads. A net prestressing effect is thus provided by the washer. A similar effect

will, of course, arise when two plain hardened steel washers are used instead of the customary single washer.

#### Conclusion

The results from two exploratory tests suggest that the presence of a load-indicating washer inhibits, rather than induces, loss of pretension in a bolt subject to high prying conditions. Although further flattening of the protrusions on the washer (as a result of gross overload) is seen as a source of internal deformation, it would appear that prying forces are lessened, thereby reducing permanent deformation in the bolt. In other words, deformation of the washer is substituted for deformation of the bolt and plate surface, with little change in the final deflected shape of the flanges. In another sense, the load indicator constitutes an additional hardened washer and by aiding dispersion of contact forces will, in any case, reduce permanent indentation of the plates.

Grade 10.9 bolts were used in the tests to intensify the effects under investigation. BS 4604 part 2 prohibits external tensile load on such bolts but it is clear from the tests that extremely high external load capacity exists, with only minor loss of preloading.

#### Acknowledgement

The authors would like to express their thanks to Cooper & Turner, Glywed Screws and Fastenings Limited, Sheffield, for sponsoring the work described.